

# 間歇水冷による太陽電池モジュールの発電効率向上に関する研究

Study on the efficiency of the solar cell module with intermittent water cooling system

佐藤義久<sup>\*1</sup> 鈴木将史<sup>\*2</sup> 小林 大<sup>\*2</sup> 小林由和<sup>\*2</sup>  
Yoshihisa SATO Masafumi SUZUKI Masaru KOBAYASHI Yoshikazu KOBAYASHI

鈴木 勇志<sup>\*2</sup> 古田 真也<sup>\*2</sup> 森本 浩紀<sup>\*2</sup>  
Takashi SUZUKI Shinya FURUTA Hiroki MORIMOTO

## Abstract

It is necessary to use the renewable energy, such as wind power generation and photovoltaics from a viewpoint of CO<sub>2</sub> discharge regulation, environmental protection of the Earth. The power generation characteristic of a solar cell module will decrease 0.5%, if the temperature on the surface of a solar cell module rises by 1 degree C. We tried to improve the power generation efficiency of solar cell module by carrying out intermittent water cooling of the surface of solar cell module. We succeeded about 8% improvement in the power generation efficiency of the solar cell module, even if it reduces energy required for a intermittent water cooling.

キーワード：太陽光発電，太陽電池，発電効率，間歇水冷

Key Word: photovoltaics, solar cell, power generation efficiency, intermittent water cooling

## 1. はじめに

地球温暖化防止、CO<sub>2</sub>排出抑制の観点から太陽光発電、風力発電など再生可能エネルギーの有効活用を図っていく必要がある<sup>(1)(2)</sup>。一般的に天候がよい日は太陽光発電に適していると思われがちであるが、日射により太陽電池モジュールの表面温度が上昇し、必ずしも太陽光発電に適しているわけではない。太陽光発電は太陽電池モジュールの表面温度が1°C上昇すると発電効率が0.5%程度劣化すると言われている<sup>(3)</sup>。特に日射量の多い夏季には太陽電池モジュールの表面温度は50~60°Cにもなり、発電効率が10%以上低下する可能性がある。太陽電池モジュールの表面温度の上昇を防ぐためには太陽電池モジュールの表面を冷却（風冷、水冷等）すればよいが、それに要するエネルギーが冷却効果以上となってしまっては意味がない。そこで、我々は太陽電池モジュールを間歇水冷し、水の気化熱を利用することにより温度上昇を抑えると同時に、それに要する電力を最小限に抑える間歇水冷方式が有効ではないかと考え、冷却効果と発電効率の改善について実験的研究を行った。

\*1 大同工業大学工学部電気電子工学科 教授  
(〒457-8530 名古屋市南区滝春町10-3)  
e-mail:satoy@daido-it.ac.jp  
\*2 大同工業大学大学院 工学研究科 電気・電子工学専攻  
(原稿受付: 2008年1月28日)

た。太陽電池モジュールの定格出力（一般的に表面温度25°Cでの値）は日射量、外気温度、風速に大きく依存する。実験に際し、日射量は外部付与条件であるから絶対値ではなく、太陽電池モジュールを2枚並べて冷却の有無の相対値比較とした。一方、風速は太陽電池モジュールの表面温度に影響を与える二次因子であり、また一般的な都市部の風は風向・風速が30秒から2分程度で頻繁に変化し、かつ瞬間風速は5~6m/s以下、10分間平均風速は2m/s以下であるから<sup>(2)</sup>、このような日時を選んで実験を行い、太陽電池モジュールの出力に影響を与える直接因子ではなく、表面温度に影響を与える二次因子と考えた。太陽電池モジュールの出力は表面温度に最も強く依存しているので、本研究の目的は“住宅の屋根などに設置する太陽電池モジュールの表面温度を下げる簡単な方法として間歇水冷方式を提唱し、その有効性を実験的に検証すること”とした。

## 2. 実験の背景・目的

太陽電池モジュールの表面温度を下げる方法として、池や湖などに太陽電池モジュールを浮かべる方式があるが、住宅の屋根などに設置する太陽光発電には適用できない。著者らは住宅の屋根などで使用されている太陽電池モジュ

ールの表面温度の上昇を防ぐ方法として、毛細管現象を利用し太陽電池モジュール表面に水を流す方法や、直接水を掛け冷却する方法を研究してきた。毛細管現象を利用し太陽電池モジュール表面に水を流す方法では水の流れる範囲が狭く太陽電池モジュール全体を冷却できなかった。一方、太陽電池モジュール表面に直接水を掛け冷却する方法では大きな冷却効果が得られることがわかった。しかし、本方式では冷却のための電力が冷却による太陽電池の効率向上を上回ってしまい、総合効率はかえって下がってしまうという欠点があった。そこで、太陽電池モジュール表面の冷却に要する電力を最小限に抑える方法を見つけるための実験的研究を行った。

### 3. 予備実験（太陽電池の連続水冷実験）

#### 3.1 実験装置概要

太陽電池モジュール（以下 PV モジュールと略称する）の特性把握と連続水冷による発電効率向上を調べるために以下の予備実験を行った。PV モジュール 2 枚を名古屋市南区の大同工業大学 D 棟屋上に真南の方角に傾斜角 35° で設置した。表 1 に PV モジュールの仕様を示す。片方の PV モジュールには散水ができるよう穴を開けたパイプを上部に設置し、下部には水受けを用意し水を循環利用することとした。水を循環利用した理由として、実際に一般住宅に設置された場合に、雨水をタンクなどに貯めて使用することを想定したためである。水受けからパイプまでの水の汲み上げはバスポンプ（株式会社工進製 mini pondy KP-25：入力 AC100V-31VA、出力 DC12.0V-1.5A：水量 17 ~18?/分（揚程 0.5m））を改良し、DC12V のみで動くようにして使用し、電源は DC12V バッテリから供給した（図 1 参照）。なお、ポンプの性能を確認するため、水受けから散水パイプまでの高さを変えて揚水量を測定する予備実験を行った。実験結果は、揚程 3m では 10~11?/分、本実験の揚程 1m に相当する揚水量は 15~16?/分であった。

また、水冷する PV モジュールを PV1 とし、水冷しない PV モジュールを PV2 とした。

#### 3.2 PV モジュールの特性確認実験

PV モジュールの冷却効果と発電効率の改善について検証するため、先ず次の 2 つの実験を行った。

##### (1) 非水冷 I-V 特性測定実験

2 つの PV モジュールに特性の差異がないことを確認するために、非水冷時の I-V 特性を測定する。また、PV モジュールの表面・裏面の温度差を比較する。

##### (2) 連続水冷 I-V 特性測定実験

PV1 を、ポンプを使用して 30 分以上連続水冷し、PV モジュールの温度が十分に下がったところで I-V 特性を測定し、非水冷の PV2 の I-V 特性と比較し、水冷による効率向上の有効性を確認する。

Table 1 Specifications of PV module.

表 1 太陽電池モジュールの仕様

PV module	SHARP NE-70A1T
Type	Polycrystal Si
Maximum power	70W (15.8V-4.43A)
Open circuit voltage	20.4V
Short circuit current	4.87A

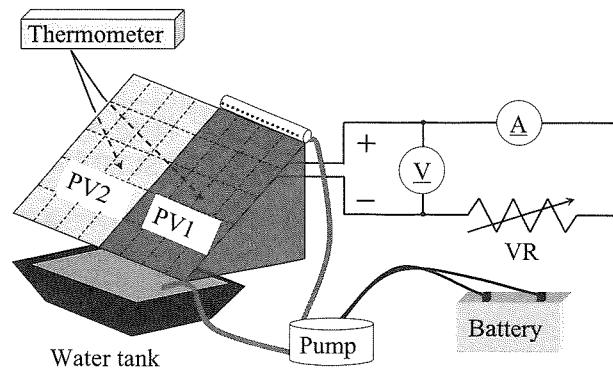


Fig.1 Conceptual figure of experiment equipment.

図 1 実験装置構成図

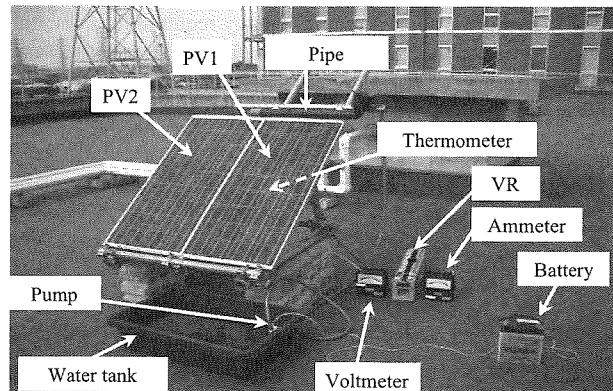


Fig.2 Photograph of experiment equipment.

図 2 実験装置概観

#### 3.2.1 実験方法

PV モジュールに直流電流計、直流電圧計、可変抵抗を接続し、晴れた日の大学校舎屋上で PV モジュールの出力が最も高い時間帯である 12 時~14 時に実験を行った（図 2 参照）。測定方法は可変抵抗の抵抗値を  $1\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $3\Omega$ ,  $4\Omega$ ,  $5\Omega$ ,  $10\Omega$ ,  $15\Omega$ ,  $19\Omega$  と設定し、各抵抗値で太陽電池の電流・電圧を測定し、同時に PV モジュールの表面・裏面温度も測定する。また、PV モジュールの表面の汚れや埃の影響をなくすため表面を洗浄することとしたが、洗浄することにより PV モジュールの温度が下がることを避けるため実験開始 30 分以上前に表面を洗浄した。電流計・電圧計は、YOKOGAWA ELECTRIC WORKS 製 CLASS0.5

を使用し、可変抵抗は、スライド抵抗（YAMABISHI 製 SLIDE RHEOSTAATS TYPE D-7）を用いた。また、PV モジュール表面温度の計測は非接触型の赤外線温度計（CENTER TECHNOLOGY CORP 製 CENTER 350）を用いて PV モジュールの中央付近を測定し、PV モジュール裏面温度の計測には、デジタル温度計（DER EE 製 DE-20W 温度計）をアルミテープで PV モジュールの裏面の中央に固定して測定した。ただし、実験時の外気温は 33~38°C、瞬間風速は 1~5m/s、10 分間平均風速は 2m/s 以下であった。なお、風速の測定は簡易風速計（(株)佐藤計量器製作所製、型式；Thermo-Anemometer Model PC-51D）を用いた。

### 3.2.2 非水冷 I-V 特性測定実験結果

2 つの PV モジュール（PV1, PV2）の I-V 特性の測定結果を表 2 及び図 3 に示す（測定日時：2007 年 8 月 24 日 13 時頃）。図 3 の MPP は最大電力点（MPP: Maximum Power Point）を示す。PV1 の MPP は 60.0W であり、PV2 の MPP は 60.5W である。この時の MPP を比較すると、

$$\frac{PV1 \text{MPP}}{PV2 \text{MPP}} = \frac{15.0V \times 4.0A}{15.5V \times 3.9A} = \frac{60.0W}{60.5W} = 0.9917 \approx 99.2\%$$

であり、その差異は 0.8% であった。

Table 2 Measurement result of I-V characteristic.

表 2 非水冷 I-V 特性測定結果

Resistance [Ω]	Temperature[°C]			Voltage [V]	Current [A]	Power [W]
	Surface	Back	Difference			
1	48.5	50.5	2.0	6.4	4.5	28.8
2	48.5	50.4	1.9	11.8	4.5	52.5
3	49.0	50.4	1.4	14.8	4.0	59.2
4	48.5	50.4	1.9	15.8	3.6	56.9
5	49.0	50.4	1.4	16.6	3.1	51.5
10	48.5	50.4	1.9	18.0	1.6	28.8
15	49.0	50.4	1.4	18.4	1.1	20.2
19	48.5	50.4	1.9	18.4	0.9	16.6

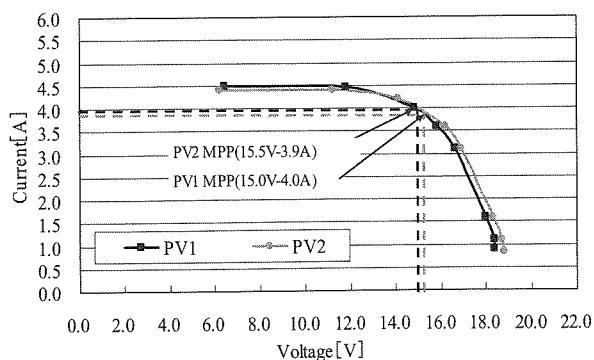


Fig.3 I-V characteristic (non water cooling).

図 3 非水冷時の I-V 特性

以上の実験結果より、今後、2 つの PV モジュールの特性に差異はないものとして実験を行うこととした。また、PV モジュールの裏面は熱がこもりやすいため、一般的に表面よりも温度が高くなるが、実験の結果、表 2 に示すよう PV モジュールの表面と裏面の温度差は 2°C 以下であり、また、PV モジュールの表面にはガラス板があり表面の温度が直接は測れず、さらに、今後の実験で表面に水を流すので水温を測ってしまう可能性がある。そこで、PV モジュールの裏面温度が下がれば、PV モジュール全体の温度が下がったと考えられるので、今後の実験では PV モジュールの温度として裏面温度を測定することとした。

### 3.3 連続水冷 I-V 特性測定実験結果

PV1 を連続水冷（PV2 は非水冷）した 2 つの PV モジュール（PV1, PV2）の I-V 特性は、図 4 に示すとおりである（測定日時：2007 年 9 月 4 日 12 時頃）。PV1 の MPP は 69.3W であり、PV2 の MPP は 61.2W であった。この時の MPP を比較すると、

$$\frac{PV1 \text{MPP}}{PV2 \text{MPP}} = \frac{16.5V \times 4.2A}{15.3V \times 4.0A} = \frac{69.3W}{61.2W} = 1.1323 \approx 113.2\%$$

となり、13.2% の発電効率向上が図られた。

しかし、この発電効率向上には水を汲み上げるためのポンプの使用電力が含まれておらず、ポンプの使用電力（12.0V × 1.5A = 18.0W）を含めると、

$$\frac{PV1 \text{MPP}}{PV2 \text{MPP}} = \frac{69.3W - 18.0W}{61.2W} = 0.8382 \approx 83.8\%$$

となり、16.2% も発電効率が低下してしまい、水冷した意味がない。そこで、発電効率向上のためのポンプ使用電力をできるだけ減らし、かつ発電効率が上がるよう、ポンプを間歇運転し、気化熱を利用する冷却方法で PV モジュールの温度が下がるか否かを実験的に調べることとした。

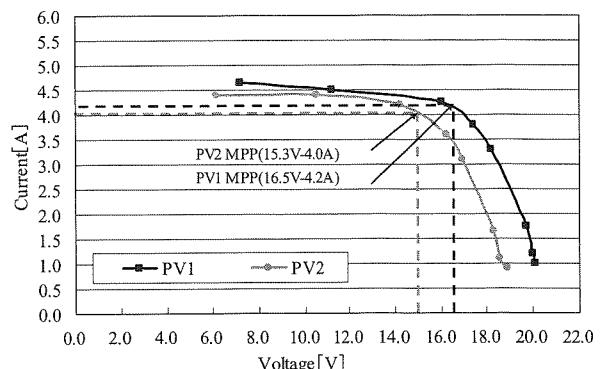


Fig.4 I-V characteristic (continuous water cooling).

図 4 連続水冷時の I-V 特性

### 4. 間歇水冷による PV モジュールの温度特性

#### 4.1 実験概要

間歇水冷による PV モジュールの温度変化と連続水冷による PV モジュールの温度変化を比較する実験を行った。図 5 に示すように、水冷を始めてから次の水冷を始めるま

での時間を水冷間隔  $T$  [sec]とし、水冷をしている時間を水冷時間  $t$  [sec]とする。また、連続水冷を止めてから PV モジュールが元の温度に戻るまでを観察し、温度が上がり始めると時間を見極めることによって、水冷間隔  $T$  の最適値を決定する。

#### 4.2 実験方法

外部気象条件をできるだけ同一にするため、実験時の外気温は 33~38°C、平均風速 2m/s 以下の日時を選び、PV モジュールの温度が 50°C 以上になる時間帯に実験を行った。水を流し始めた時刻を実験開始時刻とし、その後 15 秒おきに 2 つの PV モジュール (PV1, PV2) の裏面温度をデジタル温度計で測定した。測定は、裏面温度が下がり始めて安定するまで行った。

#### 4.3 実験結果

先ず、連続水冷による PV モジュールの裏面の温度変化を図 6 に示す。水冷開始直後から徐々に温度が下がり始め、10 分程度で 36°C 付近の温度で安定した。この時の PV1 と PV2 の温度差は 15.3°C であった。次に、水冷を止めた後の 2 つの PV モジュール (PV1, PV2) の温度変化を図 7 に示す。PV1 の裏面温度は、水冷を止めた後、約 20 分で元の温度に戻ってしまうが、水冷を止めてから 3 分程度で温度が上昇し始め、5 分では完全に温度が上がり始めている。この実験結果から、水冷間隔  $T$  の最大値を 3 分 (180sec) 程度と推測した。そこで、本実験では水冷間隔  $T$  を 30sec, 60sec, 120sec, 180sec, 300sec と設定し、水冷時間  $t$  をそれぞれの水冷間隔  $T$  において 5sec, 10sec とした場合に、冷却効果に差があるか否かを調べる。

#### 4.4 実験結果（間歇水冷による温度特性）

間歇水冷の有効性を確かめるため、 $T=30sec$ ,  $t=10sec$  の水冷パターンで間歇水冷を行ったときの PV モジュールの温度変化を図 8 に示す。図中に示した縦線は水冷を行った

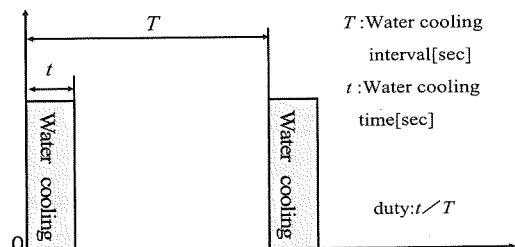


Fig. 5 Intermittent water cooling method.

図 5 間歇水冷方法

時間を示す。間歇水冷においても 10 分程度で温度が安定し、15.9°C の温度差が得られている。また、温度が下がる速度は、図 6 の連続水冷より間歇水冷の方が早いことが分かり、これより PV モジュールの温度を下げるには水を流しつ放しにする連続水冷方式よりも、気化熱による冷却効

果を利用する間歇水冷方式がより効果的であることが分かる。しかし、この水冷パターンでのポンプの平均使用電力は、18W (使用電力) × 10sec (使用時間) / 30sec (水冷間隔) = 6.0W (平均使用電力) とまだ大きい。

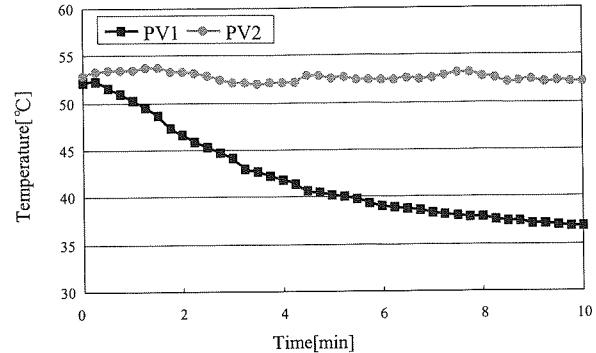


Fig. 6 Temperature change of PV module  
(Continuous water cooling).

図 6 連続水冷による PV モジュールの温度変化

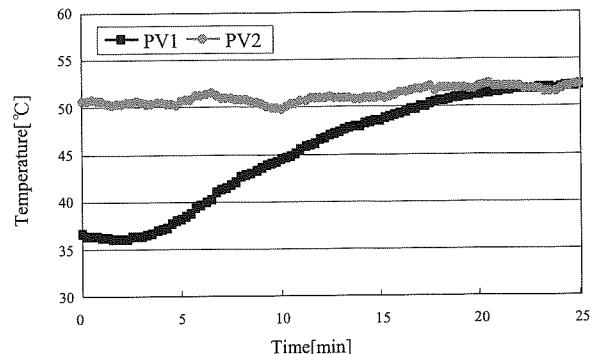


Fig. 7 Temperature change of PV module  
(After continuous water cooling).

図 7 連続水冷後の PV モジュールの温度変化

そこで、水冷間隔  $T$  を大きくすることにより、ポンプの平均使用電力を減らすことを考えた。 $t=10sec$  とし、 $T$  を 60sec, 120sec, 180sec, 300sec とした場合の PV モジュールの温度変化を図 9~12 に示す。 $T=60sec$ , 120sec, 180sec (図 9~11) では、 $T=30sec$  の時と同様、すべて 10 分以内に 10~20°C の温度差が得られた。しかし、 $T=300sec$  (図 12) では、連続水冷を止めてから PV モジュールが元の温度に戻るまでを観察する実験同様 (図 7 参照)、温度は下がるものポンプを止めてから約 3 分程度で温度が上昇し始め、その後水冷を始めたところでまた温度が減少し始めている。以上の実験結果より、やはり、 $T=180sec$  (3min) が最適であることが分かった。次に、水冷時間  $t$  を短くすることにより、ポンプの平均使用電力を減らすことを試みた。 $T=180sec$ ,  $t=5sec$  の水冷パターンで間歇水冷を行ったときの PV モジュールの温度変化を図 13 に示す。図 11 に示した  $T=180sec$ ,  $t=10sec$  の水冷パターンと特徴的な差は無い

ことから、間歇水冷の時間  $t$  は消費電力の少ない 5sec で十分であることが分かった。以上の実験結果を表 3 にまとめて示す。表 3 に各間歇水冷パターンで得られた温度差、各温度差での理論上の出力増加分（温度差×1°Cあたりの出

力増加）、ポンプの平均使用電力（ポンプの使用電力×水冷時間  $t$  / 水冷間隔  $T$ ）及び、ポンプの平均使用電力を差し引いた正味の出力増加分を示した。PV1 と PV2 の温度差が最大となり、PV1 の出力が最も向上する条件は  $T=60\text{sec}$ ,

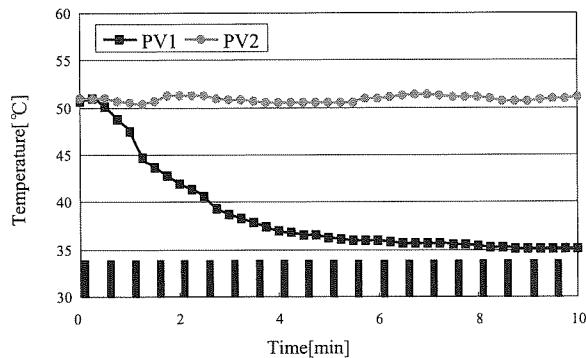


Fig.8 Temperature change of PV module  
(Intermittent water cooling ( $T=30\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )).  
図 8 間歇水冷による PV モジュールの温度変化  
( $T=30\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )

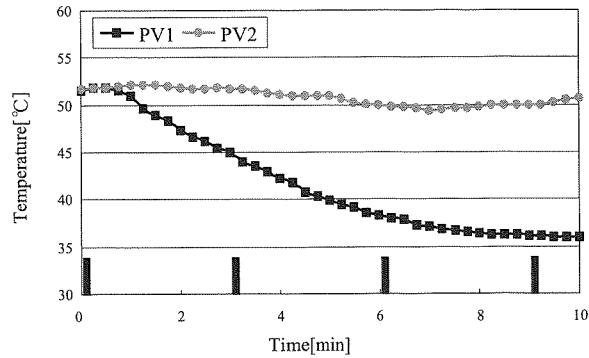


Fig.11 Temperature change of PV module  
(Intermittent water cooling ( $T=180\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )).  
図 11 間歇水冷による PV モジュールの温度変化  
( $T=180\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )

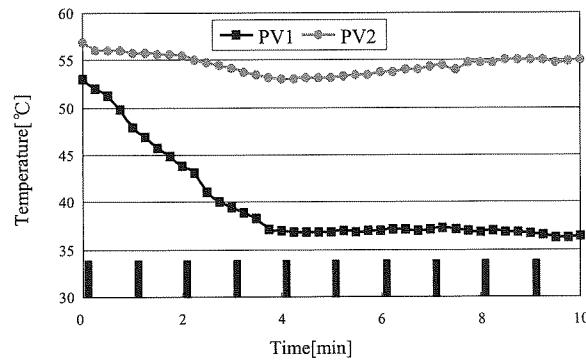


Fig.9 Temperature change of PV module  
(Intermittent water cooling ( $T=60\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )).  
図 9 間歇水冷による PV モジュールの温度変化  
( $T=60\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )

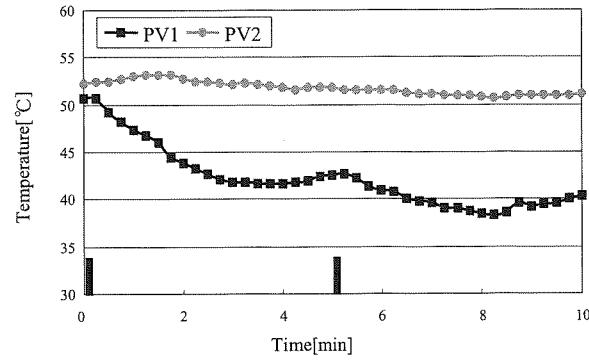


Fig.12 Temperature change of PV module  
(Intermittent water cooling ( $T=300\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )).  
図 12 間歇水冷による PV モジュールの温度変化  
( $T=300\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )

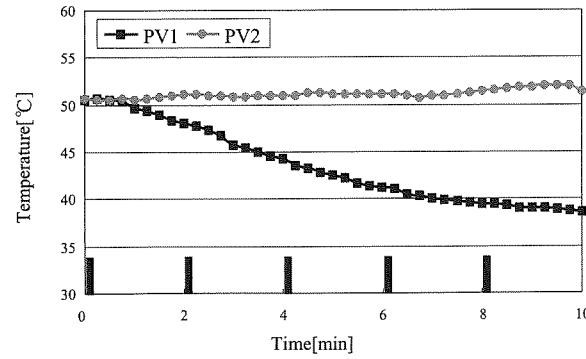


Fig.10 Temperature change of PV module  
(Intermittent water cooling ( $T=120\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )).  
図 10 間歇水冷による PV モジュールの温度変化  
( $T=120\text{sec}$ ,  $t=10\text{sec}$ )

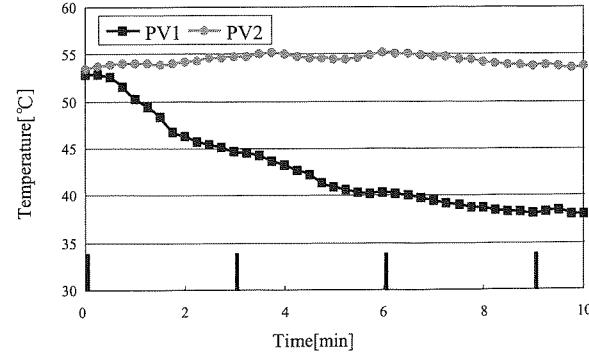


Fig.13 Temperature change of PV module  
(Intermittent water cooling ( $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$ )).  
図 13 間歇水冷による PV モジュールの温度変化  
( $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$ )

$t=10\text{sec}$  の 7.67W であったが(表 3 のハッキング部分参照), ポンプの平均使用電力が大きく(3W), 正味の電力増加は 4.67W である。一方,  $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$  は, 発電量が 6.44W 増加し, ポンプの平均使用電力は 0.5W であるから, 正味の電力増加は 5.94W となり, 発電量の増加は最大となることが分かった(表 3 のハッキング部分参照)。そこで, 正味の発電量の増加が最大となる  $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$  の間歇水冷パターンで PV モジュールを間歇水冷した状態で I-V 特性を測定し, 実際の間歇水冷における総合発電効率の向上を調べることとした。

Table 3 Power increase in the various water cooling method.

表 3 各種水冷方式による出力の増加

Water cooling method $T$ , $t$ [sec]	Temperature difference [°C]	Power increase of PV module $P_i$ [W]	Average pump power ( $18\text{W} \times t/T$ ) $P_p$ [W]	Net increase in power $P_i - P_p$ [W]
Continuous	15.3	6.27	18.00	-11.73
Intermittent water cooling	$T=30$ $t=5$	15.9	6.52	3.00
	$T=30$ $t=10$	16.0	6.56	6.00
	$T=60$ $t=5$	16.1	6.60	1.50
	$T=60$ $t=10$	18.7	7.67	3.00
	$T=120$ $t=5$	12.8	5.25	0.80
	$T=120$ $t=10$	12.8	5.25	1.50
	$T=180$ $t=5$	15.7	6.44	0.50
	$T=180$ $t=10$	14.8	6.07	1.00
	$T=300$ $t=5$	13.0	5.33	0.30
	$T=300$ $t=10$	10.7	4.39	0.60
				3.79

## 5. 間歇水冷による PV モジュールの発電効率向上実験

### 5.1 実験方法

間歇水冷方式による PV モジュールの発電効率の向上は,  $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$  の場合に最大となることがわかつたので, この条件下で間歇水冷を行い, 2 つの PV モジュールの I-V 特性を測定し, その効果を検証する。測定方法, 測定機器などは 3.予備実験と同様である。

### 5.2 実験結果

PV1 を  $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$  で間歇水冷(PV2 は非水冷)した 2 つの PV モジュール(PV1, PV2) の I-V 特性は, 図 14 に示すとおりであった(測定日時: 2007 年 9 月 26 日 13 時頃)。2 つの PV モジュール PV1 の MPP は 73.5W であり, PV2 の MPP は 67.5W である。また, ポンプの平均使用電力は,  $18\text{W}$  (使用電力)  $\times 5\text{sec}$  (水冷時間) /  $180\text{sec}$  (水冷間隔) = 0.5W (平均使用電力) となる。このポンプの平均使用電力を考慮した発電効率の向上は,

$$\frac{\text{PV1MPP}}{\text{PV2MPP}} = \frac{73.5\text{W} - 0.5\text{W}}{67.5\text{W}} = 1.0814 \approx 108.1\%$$

となり, 8.1%の発電効率の向上が得られたことになる。このときの 2 つの PV モジュールの温度差は  $16.1^\circ\text{C}$  であるから, 発電効率の温度依存性は  $0.5\%/\text{°C}$  であることが分かった。

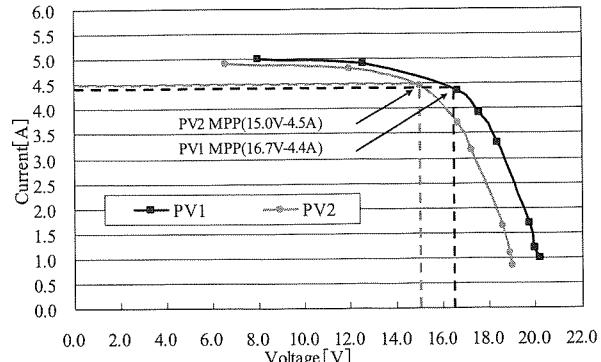


Fig.14 I-V characteristic  
(Intermittent water cooling( $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$ )).

図 14 間歇水冷時の I-V 特性 ( $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$ )

### 6. まとめ

太陽電池モジュールの表面温度を間歇水冷により下げるこにより, 発電効率を向上させる実験的研究を行い以下の成果を得た。

- (1) PV モジュールの表面を間歇水冷することにより, PV モジュール表面温度を十分下げられることを実証した。
- (2) 連続水冷よりも間歇水冷の方が温度降下がはやく,  $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$  のときポンプの平均使用電力を考慮しても発電効率の向上が最大となり, 発電量が約 8%増加した。
- (3)  $T=180\text{sec}$ ,  $t=5\text{sec}$  の間歇水冷による発電実験において, ポンプの平均使用電力を考慮した場合,  $0.5\%/\text{°C}$  発電効率が向上した。

### 7. 今後の課題

今回の実験は 8 月, 9 月と暑い時期に行ったので PV モジュールの表面温度は  $50^\circ\text{C}$  以上となり, 間歇水冷の効果が顕著に出た。今後, PV モジュールの表面温度が低い春・秋にも実験を行い, 周囲温度別の間歇水冷方法のデータを収集し, 周囲温度をフィードバックして間歇水冷のデューティ比  $t/T$  を自動的に決定する学習制御機能付き間歇水冷装置の実用化に貢献していきたい。

### 参考文献

- 1) 鳩田隆一 監修, 佐藤義久 著, 「図説 電力システム工学 電気をつくる・送る・ためる!」(2002), pp.123-129, 丸善
- 2) 佐藤義久・吉田尚嗣・鳩田隆一:「都市型風力発電システムの実用化開発」, 電学論 D, 125 卷, 11 号 (2005), pp.1016-1021
- 3) 小林誠・谷辰夫:「環境因子の変化に対する太陽電池モジュールの出力特性」, 太陽エネルギー, 109 卷, 4 号 (1993), pp.39-46