

間歇水冷による 10kW 級太陽電池の 出力向上に関する研究

Study on the efficiency of the 10kW class solar cell with intermittent water cooling system

佐藤義久 ^{*1}	河内将成 ^{*2}	若林大地 ^{*2}	垣野 雄輝 ^{*2}
Yoshihisa SATO	Katsunari KOHCHI	Daichi WAKABAYASHI	Yuki KAKINO
楠崎 寛之 ^{*2}	溝口 和洋 ^{*2}	村井 一哉 ^{*3}	
Hiroyuki KUSUZAKI	Kazuhiro MIZOGUCHI	Kazuya MURAI	

Abstract

It is necessary to use the renewable energy, such as photovoltaics is required for realization of low carbonized society. The power generation characteristics of a solar cell will decrease 0.5%, if the temperature on the surface of a solar cell rises by 1 degree C. We tried to improve the power generation efficiency of solar cell by carrying out intermittent water cooling of the surface of solar cell with a sprinkler. We succeeded about 5.8% improvement in the power generation efficiency of the solar cell with the intermittent water cooling method of the 10kW solar cell.

キーワード：太陽光発電，太陽電池，発電効率，間歇水冷

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

1. はじめに

低炭素社会の実現に向け，発電時に CO₂ を排出しない太陽光発電，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^{1,2)}。太陽電池は表面温度が 1℃ 上昇すると発電効率が 0.5% 程度低下する³⁾ ので，天候のよい日は太陽電池の表面温度が上昇してしまい，必ずしも太陽光発電に適しているわけではない。特に日射の強い夏季には太陽電池の表面温度は 50 ～ 60℃ にもなり，発電効率が 10% 以上低下する可能性がある。表面温度の上昇を防ぐためには風冷，水冷などで表面を冷却すればよいが，それに要するエネルギーが冷却効果以上となってしまうては意味がない。我々は太陽電池表面を間歇水冷し，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，それに要する電力と水を最小限に抑える間歇水冷方式を提案し，実験的研究により，その有効性を実証した^{4,5)}。本研究の目的は，間歇水冷による従来の研究成果^{4,5)}を 10kW 太陽電池に適用した場合，どの程度の効果が得られるかシミュレーションで推測し，その妥当性を 10kW 太陽電池を用いて実験的に検証し，その結果，今後のメガソーラー，ギガソーラーへ間歇水冷を適用する場合の基礎データとすることである。

2. 研究の背景・目的

太陽電池の表面温度を下げる方法として，太陽電池を住宅の屋根に設置する場合，太陽電池裏面と屋根の間に空間を設け煙突効果により自然風冷する方法が考案されているが十分な冷却効果は得られていない。また太陽電池裏面を直接冷却する方法として池や湖などに太陽電池を浮かべる方式が既の実施されているが，設置場所が限定され，あまり普及していない。著者らは住宅や工場の屋根などに設置する太陽電池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表面に水を流す方法や，直接水を掛

^{*1} 大同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} 大同大学大学院 工学研究科 電気・電子工学専攻

^{*3} 太平電業株式会社
(原稿受付：2012 年 3 月 31 日)

けて冷却する方法を研究してきた⁴⁾。毛細管現象を利用し太陽電池表面を冷却する方法では十分な冷却効果が得られず、太陽電池表面に直接水を掛けて冷却する方法は大きな冷却効果が得られるが冷却のための電気料金と冷却水料金が冷却による太陽電池の発電効率向上分を上回ってしまい、総合効率はかえって下がってしまうという欠点がある。そこで我々は太陽電池表面の冷却に要する電力と水を最小限に抑えつつ発電効率の向上を図る間歇水冷方式を提案し、その有効性を1kW級太陽電池を用いて実証した⁴⁵⁾。本研究の目的は、10kW級太陽電池の1年間の水冷なしの発電実験データと各季節での1ヶ月毎の間歇水冷実験データを基にシミュレーションを行った後、各月の間歇水冷実験結果とシミュレーション結果の比較検討を行い、シミュレーションの妥当性を検証することである。

3. 10kW 級太陽電池の発電特性

3.1 10kW 級太陽電池の概要

将来的にメガソーラー、ギガソーラーへの間歇水冷適用を想定しているが、先ず、メガソーラーでの間歇水冷実験を行う前に、メガソーラーに間歇水冷を適用した場合の効果を把握する必要がある。そこで、10kW級太陽電池で間歇水冷を行ったときに、どの程度発電効率が向上するかを、10kW級太陽電池の実測データを用いて算出する。算出した予測値を実験結果と比較することで、その算出手法（以降、シミュレーションという）の妥当性の確認を行う。大同大学のD棟屋上に設置した10kW級太陽電池は、定格出力305WのSUNPOWER社製太陽電池を6直列・6並列で合計36枚（総発電量10,980W）接続し、真南に向け設置角度10°で設置した。実験に使用した太陽電池の仕様を表1に、実験装置の外観を図1に示す。シミュレーションを行う為、先ず、間歇水冷を行わずに10kW級太陽電池の日射量・発電量データを1年間にわたって収集した。電流、電圧の測定には、カレントセンサ（日置電機製 カレ

Table 1 Specifications of Photovoltaics.
表1 太陽電池の仕様

Photo Voltaic (PV)	SUNPOWER 305 SOLAR PANEL
Type	Monocrystal Si
Peak Power	305W (54.7V—5.58A)
Open circuit voltage	64.2V
Short circuit current	5.96A

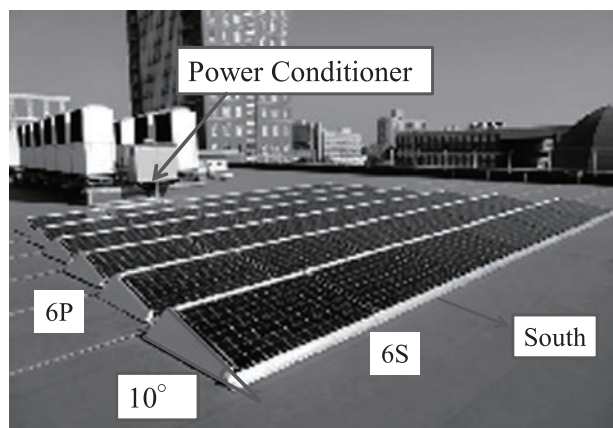


Fig.1 Photograph of experiment equipment.
図1 実験装置外観

ントセンサ CT6862) とパワーアナライザ（日置電機製 パワーアナライザ 3390）を使用した。日射量の測定には日射計（英弘精機製 全天日射計 MS602）と日射計データロガー（日置電機製 メモリハイコーダ 8430）を使用した。

3.2 10kW 級太陽電池の発電特性

日射量及び10kW級太陽電池の発電量を2010年3月～2011年2月の間にわたり測定した。図2のグラフに各月の設置角度10°の日射量積算値と、DC発電量積算値を示す。図2のグラフより、日射量とDC発電量の積算値は5月が最大になり、1年間で太陽高度が最も低くなる12月に、日射量と発電量の積算値も最小となることが分かる。

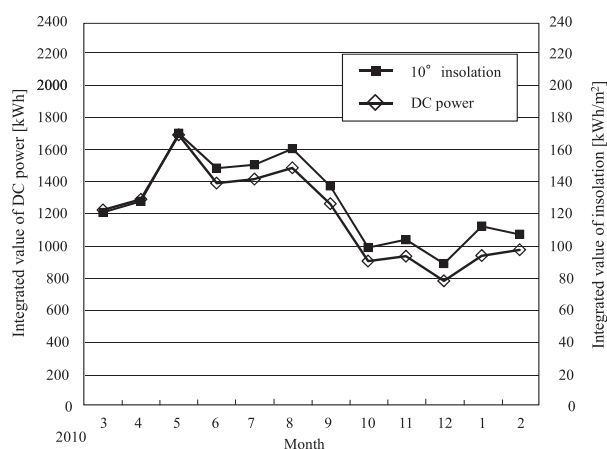


Fig.2 Integrated value of 10° insolation and DC power.
図2 10°日射量積算値とDC発電量

4 10kW 級太陽電池の間歇水冷シミュレーション

4.1 10kW 級太陽電池の間歇水冷シミュレーション方法

10kW 級太陽電池に間歇水冷を適用した場合の出力を, 2010 年 3 月～2011 年 2 月の実測データを基に, シミュレーションによって算出した。日射量及び太陽電池の温度が高くなる時間に水冷を行うものとし, 太陽電池の表面温度上昇の様子(時間変化)を各季節で調査し, 太陽電池表面温度が 50℃ 以上になる時間帯として, 春季は 10 時～15 時の 5 時間, 夏季は 9 時～16 時の 7 時間, 秋季は 10 時～15 時の 5 時間, 冬季は 10 時 30 分～14 時 30 分の 4 時間水冷を行うものとする(表 2 参照)。また, 曇りや雨といった日射量が少ない日に水冷を行っても効果が得られないため, 図 3 のように, 各月の日射量積算値の平均より日射量の高い日に間歇水冷を行うも

Table 2 Condition of Simulation.
表 2 シミュレーション条件

Season	Month	Time	Efficiency up [%]
Spring	March～May	10:00～15:00 (5h)	3.2
Summer	June～August	9:00～16:00 (7h)	5.7
Autumn	September～November	10:00～15:00 (5h)	3.2
Winter	December～February	10:30～14:30 (4h)	4.2

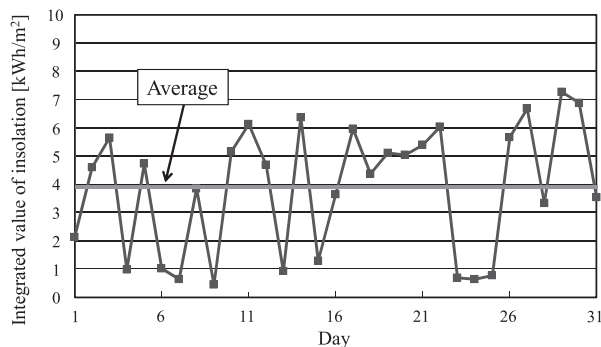


Fig.3 Condition of Simulation (2)
図 3 シミュレーション条件 (2)

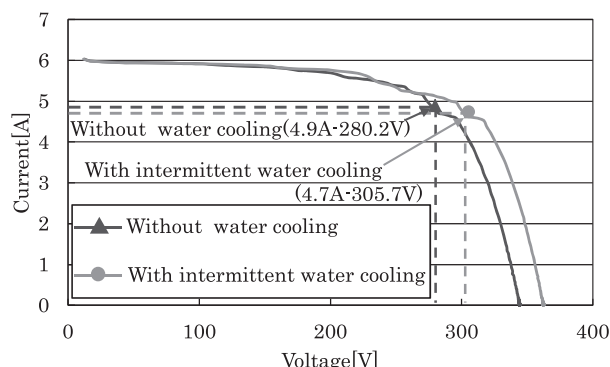


Fig.4 I-V characteristic (28 June 2011)
図 4 I-V 特性 (2011 年 6 月 28 日)

のとする。実験日の日射量はその月の平均日射量よりも高いか低いかを事前には知ることは不可能である。そこで曇り, 雨天時以外は実験を行い, データ整理の段階で本来間歇水冷を行うべき日か否かを判断した。間歇水冷を行っている間, 発電効率は 5.7% 向上するものとして発電量の算出を行った。効率向上分 (5.7%) は予備実験より, 10kW 級太陽電池 1 列の水冷前の出力 (1370.3W) と間歇水冷後の出力 (1447.8W) を比較することで求めた(図 4 参照)。

4.2 間歇水冷シミュレーション例

上記のシミュレーション方法を, 2010 年 9 月 4 日の実験データ*に適用した場合の発電量増加を図 5 に示す。秋季は, 10 時～15 時に間歇水冷を行うと, 発電量が 2.2kWh 増加する。間歇水冷中は発電効率が 5.7% 向上し, 1 日の平均で 3.5% 向上することが分かった。夏季(2010 年 8 月)の実験データにシミュレーションを適用した結果を図 6 に示す。1 ヶ月に 19 日水冷を行う日があり, 1 ヶ月で発電量が合計 47.8kWh 増加し, 発電効率が 1 ヶ月の平均で 3.2%

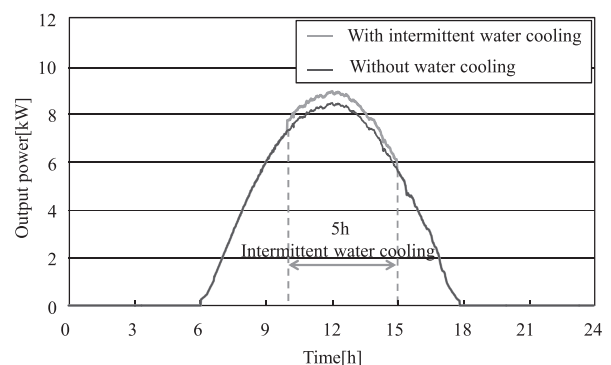


Fig.5 Simulation of output power increase with intermittent water cooling (simulation, 4 September 2010)

図 5 間歇水冷シミュレーション結果 (2010 年 9 月 4 日)

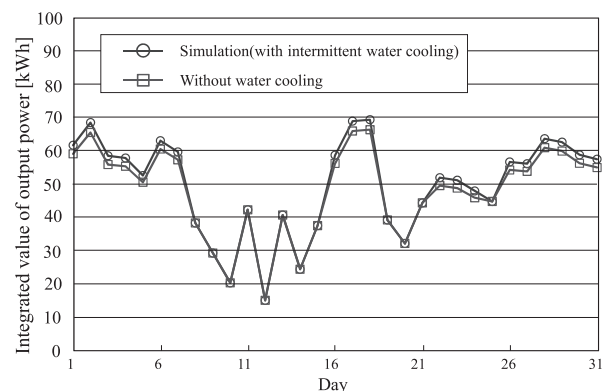


Fig.6 Output power increase of intermittent water cooling (simulation, August 2010)

図 6 間歇水冷シミュレーション結果 (2010 年 8 月)

向上することが分かった。

* (注) 図5に示すような実験データは7月～9月にかけて多数あるが実験中に雲がかかり出力が大きく変動し、平均値としては間歇水冷の効果は充分でているが、間歇水冷の効果を経視的に得にくい。9月4日の実験データは、雲もなく、1日快晴で極めて典型的なデータなので例示した。

4.3 間歇水冷シミュレーション結果

1年間(2010年3月から2011年2月)の実測データに間歇水冷シミュレーションを適用した結果を図7に示す。7月と8月は間歇水冷による発電量増加効果がよく表れていることがわかる。365日中206日に水冷を行う日があり、1年間で発電量が合計414kWh増加し、発電効率は1年間の平均で2.9%向上するという予測結果が得られた。

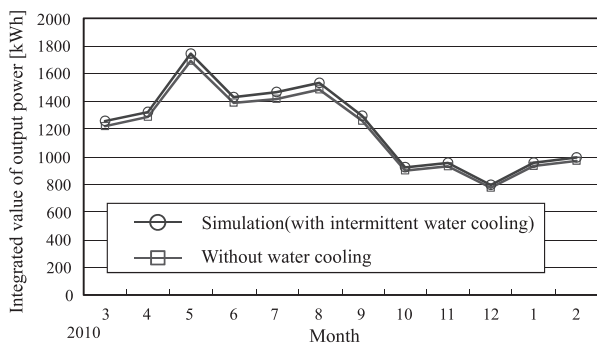


Fig.7 Output power increase of intermittent water cooling (simulation, 1year)
図7 間歇水冷シミュレーション結果(年間)

5. 10kW 級太陽電池の最適間歇水冷パターン

5.1 間歇水冷実験概要

前項のシミュレーション手法の妥当性を確認する為に、10kW 級太陽電池を用いて間歇水冷による発電特性実験を行い、測定した実測値とシミュレーションで算出した予測値を比較する。その為にまず、10kW 級太陽電池を用いて間歇水冷実験を行い、最適水冷パターンの決定を行う。その後、決定した最適水冷パターンで設定した時間帯に間歇水冷を行い、同時に発電量を測定する。測定した実験値とシミュレーションにより算出した予測値を比較することで、シミュレーションの妥当性を確認する。

5.2 実験装置

本実験では、比較を行う為に、図8のように10kW 級太陽電池を北から順に1, 2, 3, 4, 5, 6列とし、第2列を間歇水冷を行う太陽電池列、第5列を水冷を行わない基準の太陽電池列とした。中央

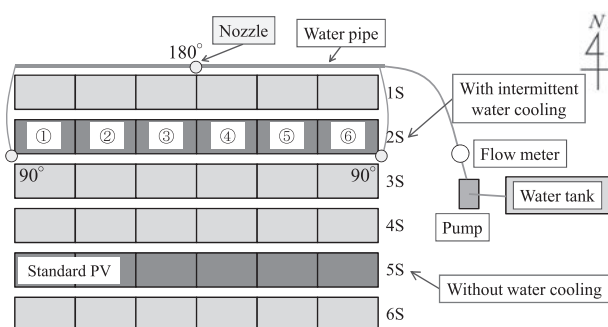


Fig.8 Conceptual figure of experiment equipment.
図8 実験装置構成図

の2列(第3列、第4列)は風向きによっては散水した水がかかってしまうために実験には使用しなかった。水冷には散水範囲が90°と180°の散水ノズル(Orbit製 薄層用フラッシュヘッド)を使用した。また、実験装置が水道から離れた位置にあるため、ポンプ(工進製 ハウスメイト MG-25)を用いて散水を行った。本実験では、第2列の太陽電池6枚と、基準として第5列の太陽電池1枚の温度を測定した。太陽電池の温度の計測には、デジタル温度計(DER EE製 DE-20W 温度計)をアルミテープで太陽電池の裏面の中央に固定して、15秒おきに太陽電池の裏面温度を測定した。水冷時間 $t = 5\text{sec}$ は固定して、水冷間隔 T を $T = 120\text{sec}$, 150sec , 180sec と変化させて間歇水冷実験を行った。(太陽電池の表面温度と裏面温度は強い相関性があることは確認済みである。)

5.3 最適間歇水冷パターンの決定

水冷時間を $t = 5\text{sec}$ に固定し、水冷間隔を $T = 120\text{sec}$, 150sec , 180sec と変化させた場合の間歇水冷実験結果を図9～図11に示す。水冷間隔 $T =$

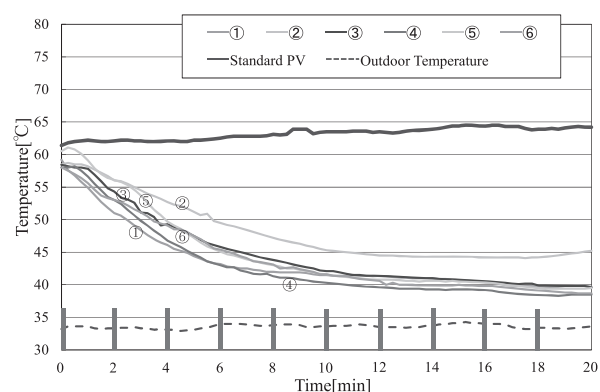


Fig.9 Temperature change of PV with Intermittent water cooling ($T = 120\text{sec}$, $t = 5\text{sec}$).
図9 間歇水冷による太陽電池の温度変化 ($T = 120\text{sec}$, $t = 5\text{sec}$)

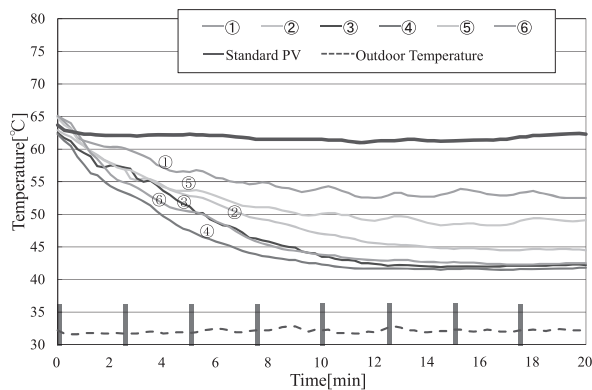


Fig.10 Temperature change of PV with Intermittent water cooling ($T = 150\text{sec}$, $t = 5\text{sec}$).

図 10 間歇水冷による太陽電池の温度変化
($T = 150\text{sec}$, $t = 5\text{sec}$)

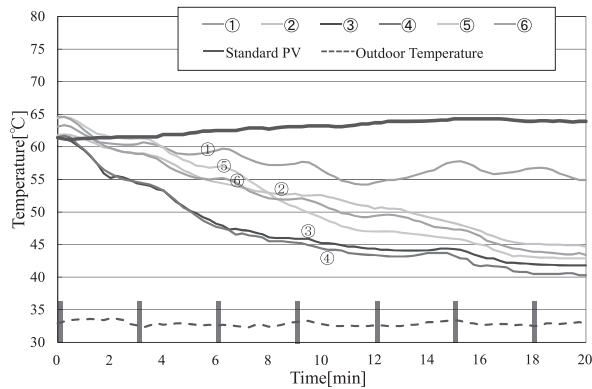


Fig.11 Temperature change of PV with Intermittent water cooling ($T = 180\text{sec}$, $t = 5\text{sec}$).

図 11 間歇水冷による太陽電池の温度変化
($T = 180\text{sec}$, $t = 5\text{sec}$)

120sec と、水冷間隔を長くした $T = 150\text{sec}$ は安定して温度が下がっている。更に水冷間隔を長くした $T = 180\text{sec}$ は、太陽電池の温度の下がり方が不安定である。よって最適水冷パターンは、水冷間隔 $T = 150\text{sec}$ 、水冷時間 $t = 5\text{sec}$ に決定した。

6. 10kW 級太陽電池の間歇水冷による発電特性実験

6.1 実験方法

決定した最適水冷パターンで、夏季（9 時～16 時）に間歇水冷を行い、同時に発電量の測定を行う。比較の為、第 2 列を間歇水冷を行う太陽電池列、第 5 列を水冷無しの基準の太陽電池列として実験を行った。第 5 列はパワーコンディショナに接続し、MPPT 制御している状態で、パワーアナライザ（日置電機製 パワーアナライザ 3390）を用いて発電量の測定を行う。それ以外の列はパワーコンディショナから切り離す。間歇水冷を行う太陽電池列は、水冷無しの太陽電池列と同じ条件にする為、 $60\ \Omega$ の

負荷に接続し、MPP 付近で発電状態にしている。間歇水冷を行う太陽電池の発電量は I-V チェッカー（英弘精機製 I-V チェッカー MP-170）を用いて測定する。測定は 3 分間隔で行い、測定時には 10 秒間、太陽電池を負荷から切り離す。太陽電池と負荷の接続、切り離しはブレーカー（三菱電機製 ノーフューズ遮断機 NF32-SW）を用いた。

6.2 実験結果及び考察

発電特性実験の典型的データを図 12 及び表 3 に示す。図 12 より、間歇水冷を行っている 9 時から 16 時の間は発電量が増加していることが分かる。表 3 には 10kW 級での発電量を想定し、実際の値を 6 倍（6 列分）した値を示している。また、ポンプの 1 日の消費電力は 203Wh と微小なため、無視した。発電量は、水冷無しと比較して、間歇水冷有りのシミュレーション値は、2.75kWh 増加して 61.8kWh になると予測され、実測値は 3.42kWh 増加して 62.5kWh になった。また、発電効率は、1 日の平均で、シミュレーションでは 4.4% 向上し、実測値では 5.8% 向上した。他の実験データでもシミュレーションでは 4～5% 向上し、実験値では 4～6% 向上している。シミュレーションと実測値は比較的よく一致しており、シミュレーション手法の妥当性が確認できた。

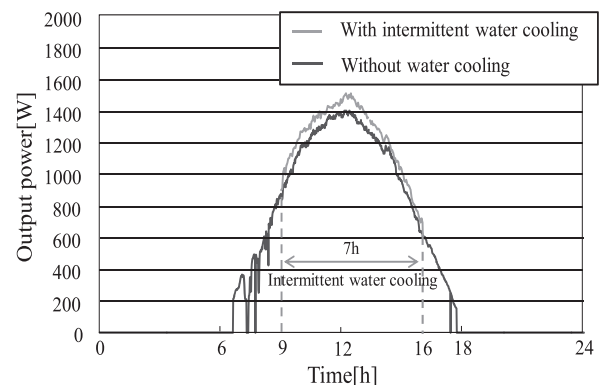


Fig.12 Output power increase of generation experiment with intermittent water cooling. (10 August 2011)

図 12 間歇水冷による発電特性向上（2011 年 8 月 10 日）

Table 3 Comparison of simulation and experiment.

表 3 シミュレーションと実験結果の比較検討

	Without water cooling	With intermittent water cooling	
		Simulation	Measured
Integrated output power [kWh]	59.04	61.79	62.46
Increase output power [kWh]		2.75	3.42
Increase efficiency [%]		4.4	5.8

7. まとめ

本研究で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 10kW 級太陽電池の1年間の発電特性データを用いて間歇水冷シミュレーションを行った結果、間歇水冷により1年間で発電量が414kWh (2.9%) 増加することが分かった。
- (2) 夏季発電特性実験より、間歇水冷により発電効率が5.8%向上することが分かった。
- (3) 10kW 級太陽電池を用いた発電特性実験の結果、発電効率はシミュレーションでは4.4%向上し、実測値は5.8%と比較的よく一致した。以上の結果、シミュレーション手法の妥当性が確認できた。

8. 今後の予定

今後、更に春季、秋季、冬季の実験データを蓄積し、シミュレーション手法の妥当性の確度を上げ、メガソーラー等の大規模太陽光発電システムに間歇水冷を適用した場合の経済効果も検討し、間歇水冷による太陽電池の発電効率向上技術の確立に貢献して行く予定である。

参考文献

- 1) 嶋田隆一監修, 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・嶋田隆一:「都市型風力発電システムの実用化開発」, 電学論 D, 125 巻, 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 巻, 4 号 (1993), pp.39-46
- 4) 佐藤義久・鈴木将史・小林大・小林由和・鈴木堯志・古田真也・森本浩紀:「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」, 日本太陽エネルギー, Vol.34, No.3 (2008-6), pp.75-80
- 5) 佐藤義久・古田真也・村井一哉・鈴木堯志・森本浩紀・吉嶺和哉・鈴木将史・松川達哉:「間歇水冷による 1kW 級太陽電池の発電効率向上に関する研究」, 太陽エネルギー, Vol.36, No.196 (2010-3), pp.57-63