

太陽光発電の発電量測定装置の開発と応用

Development and Application of Photovoltaic Measuring Equipment

小林 浩昭 南川 英樹 市川 修 (職業能力開発総合大学校)

Hiroaki Kobayashi, Hideki Minamikawa, Osamu Ichikawa

太陽光発電に対する関心の高まりとともに、その問題点も指摘されている。発電が天候に左右されるために、安定した発電量が得られにくいことに加えて、その発電量が事前に把握しにくい点である。さらに雲の動きに応じて発電出力が数秒～数分の間に大きく変化するという特徴がある。気象情報や気象予測のデータをもとに、発電量を予測するという研究がされているが、これらは、予測時間が長く、また対象とするエリアが広いという点で、特に小エリアでの利用には不十分である。この研究では、太陽電池の発電量を短い時間間隔で測定できる小型で安価な測定装置を開発した。この測定装置を用いることにより、近距離の2地点間における発電量の関係を明らかにできる。複数地点に設置し、データを解析することで天候等による太陽光発電への影響を観測し、予測技術への利用を目的としている。本論文では、新たに開発した発電量測定装置の原理・構造・特徴を示し、本装置を用いた予測手法例について説明する。

キーワード：太陽電池、日射強度、発電予測

1. はじめに

近年、太陽光発電設備の普及に伴い、電力系統への接続や電力の買取り条件に制限が設けられる傾向がある。これは、太陽光発電における発電量の不安定さに起因している。一般に、太陽光による発電は自立運転ではなく電力系統と接続して使用する「系統連系運転」が行われている。系統を運営管理している電気事業者は、太陽光発電システムを設置した需要家から日中の太陽光発電による電力余剰分を買い取り、夜間は電力を売ることによってシステムが成り立つように運用している。しかし、太陽光発電による電力は天候に左右されやすく予測が困難である。需要が少ない地域で、さらに太陽光発電システムが増えると、系統での安定的な運用が困難となり、買い取り価格の低下や買い取り制限・拒否などを招く恐れがある。資源の乏しい日本において、こうした理由により太陽光発電の普及が妨げられることは好ましくない。

上記問題の解決策としては、揚水発電や大規模な蓄電池の利用による、エネルギーの蓄積技術が挙げられる。しかし、現時点では環境面やコスト面において現実的に困難である。一方で、太陽光発電の発電量を予測する手法が提案されている¹⁾。発電量の予測が可能であれば、電力需要調整やガスタービン発電などの出力調整により、太陽光発電をより有効に使用できる可能性が高まる。太陽光発電の予測に関する提案の多くは、気象予測に基づいた日射強度からの算出で求められている。気象予測で扱われるような数100km²エリアに分散された太陽光発電システムにおいては、有効な予測手法と言える。

一方スモールグリッドや独立型の発電システムのような小エリアにおいては、太陽光発電の発電量予測は、気

象データや気象予測情報だけでは不足である。気象データだけでは、局所的な天候や雲の挙動が得られないからである。一方、一般家庭などですでに稼働中の太陽電池からの発電量データを複数地点から採取し、分析することにより、発電予測のデータとして活用できる可能性がある。気象データと比較した場合、地理的な測定間隔が小さく、太陽電池からの発電量データを直接取得できる利点がある。ただし、現時点では点在する多くの太陽光発電システムから個別に発電量データを採取することは困難である。

本研究では、小型の太陽電池を光センサとして利用した、「太陽光発電の発電量測定装置」を開発し、複数地点の発電量を測定し、発電量の予測への適用を実証することを目的としている。この測定装置は、設置を容易にするため、小型、安価、無停電式、長時間記録などを主眼に置き開発を行う。従来の日射強度測定では、日射強度と太陽電池の発電量との間にパワーコンディショナー特性、太陽電池の種類、設置角度、ソーラパネルの温度の違いなど不確定な要素が多くある。これらを排除することが可能となる。装置の原理と構造を示し、予測技術への応用例を紹介する。

2. 測定装置の原理、構成

2.1 測定原理

本装置は、光センサとして、定格5Wの多結晶型太陽光パネルを用いており、発電電力を測定している。

図1に装置の設置例と外観を示す。

実際に本装置を用いて測定した太陽電池の電圧-電流特性、電圧-電力特性を図2(a)、(b)に示す。これらの特

性や最大電力は日射強度や太陽電池の温度等の様々な条件により、時々刻々変化する。実際に利用されている太陽電池の多くは、パワーコンディショナー等の制御によって、最大電力を出力するように制御されるため、測定装置としては、その最大電力の変化を測定することが必要となる。本装置では、太陽電池出力端子に電子可変抵抗器として MOS-FET を接続し、負荷抵抗の値を連続的に変化させて図 2 に示すような特性データを測定する。

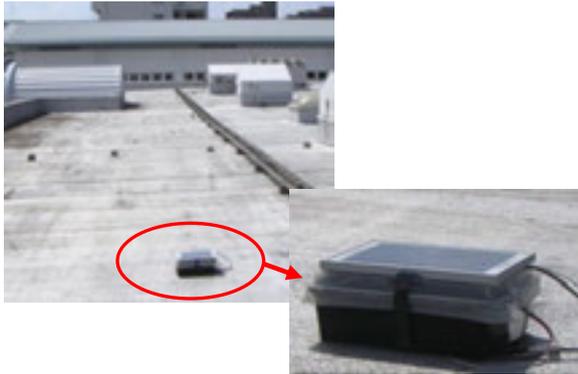
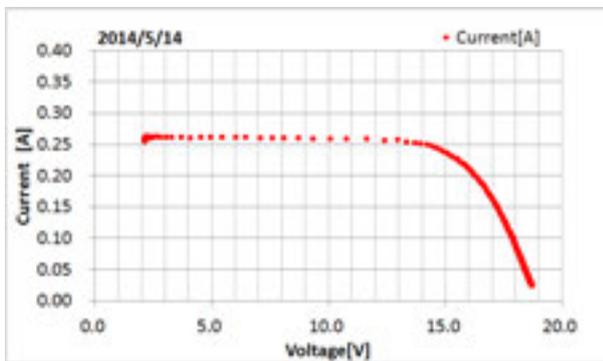
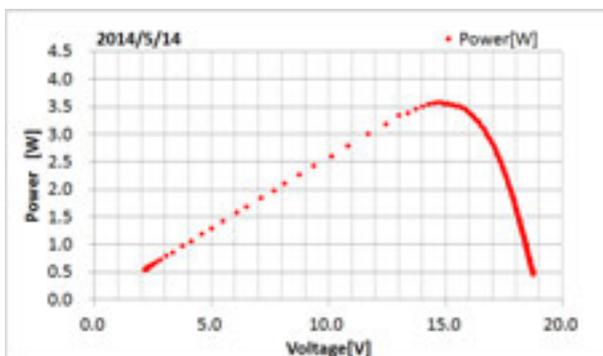


図 1 装置の設置例および外観



(a)電圧－電流特性



(b)電圧－電力特性(電圧-電流特性から算出)

図 2 太陽電池の出力特性例

(本測定装置を用いて測定 2014.5.14 12:00 東京都小平市)

2.2 測定装置の機能

本測定装置の電氣的仕様を表 1 に、ブロック図を図 3 にそれぞれ示す。

装置は、メインとサブ 2 種類の CPU を有している。メイン CPU は電子可変抵抗器として動作している MOS-FET のゲート端子電圧を決定し、その時の電流と電圧データを測定し記録する。夜間、メイン CPU を含む大半の回路は動作を停止し、電力消費を軽減する。その間、サブ CPU が時計として動作し、翌朝メイン CPU を再起動させる。

使用した MOS-FET(2SK3142)の規格を表 2 および図 4 に示す²⁾。ゲート端子－ソース端子間に適当なアナログ電圧を加えることにより、MOS-FET のドレイン－ソース間の等価抵抗値が変化することを利用して、実際の回路では MOS-FET のゲート端子に 1.7～2.2V の電圧を加えている。この値は、事前実施した実験結果に基づいて決定したが、FET の自己発熱による温度特性を考慮し、加えるゲート端子電圧の幅に余裕を持たせている。このゲート端子電圧は、メイン CPU の 10bitD/A コンバータ端子から出力された 0～3.3V のアナログ信号をオペアンプ回路で電圧調整することにより得られる(図 3 voltage shift 回路、voltage scale 回路)。同時にメイン CPU は太陽電池からの出力電圧と電流を 12bitA/D コンバータを通じてそれぞれ測定する。電流は、シャント抵抗器 (8.2Ω) 両端の電圧を測定することにより算出する。シャント抵抗器の値は、マイコン A/D コンバータの電圧分解能をもとに算出している。本装置では、MOS-FET が作る抵抗値の範囲内での電圧と電流の組み合わせデータを採取し、電力を計算している。

表 1 本測定装置の基本仕様

メイン CPU ¹⁾	RX63N (R5F563NBDDFP) 96MHz 32bit 12bitA/D×8ch、D/A×1ch、RTC、
電源	シール鉛蓄電池 12V 7.2～10 Ah (測定用太陽電池から充電)
メイン CPU 内 RTC センサ (太陽電池)	バックアップ電池、GPS で補正 (1 回/日) 5 W シリコン多結晶型 288 x 188 mm
負荷抵抗値 ²⁾ (等価抵抗値)	8 ～ 1200 Ω (MOS-FET)
測定項目	・太陽電池：電圧・電流・背面温度 ・外気温度、外気湿度、CPU 温度 ・電池電圧、MOS-FET gate 電圧、FET 温度
測定周期 ³⁾	標準 30 秒
データ回収方法 ⁴⁾	Micro SD カード (4 GB) 約 80 日分
サブ CPU	夜間動作 (PIC16F88)

*1 CPU 搭載ユニットボードを使用。SD メモリカードスロット、USB 接続端子などが装備されている。

*2 等価抵抗値は、FET のドレイン－ソース間の抵抗値を意味し、実験データから算出したものである。

*3 512 種類の可変抵抗の値に対して、太陽電池の電圧、電流を測定し記録している。メモリへのアクセスタイムを含めるとすべて終了するのに 10～20 秒程度かかる。

*4 さらに容量の大きいメモリを使えば、記録可能日数は増えるが、メモリへのアクセスタイムが長くなり、測定周期が長くなる傾向がある。

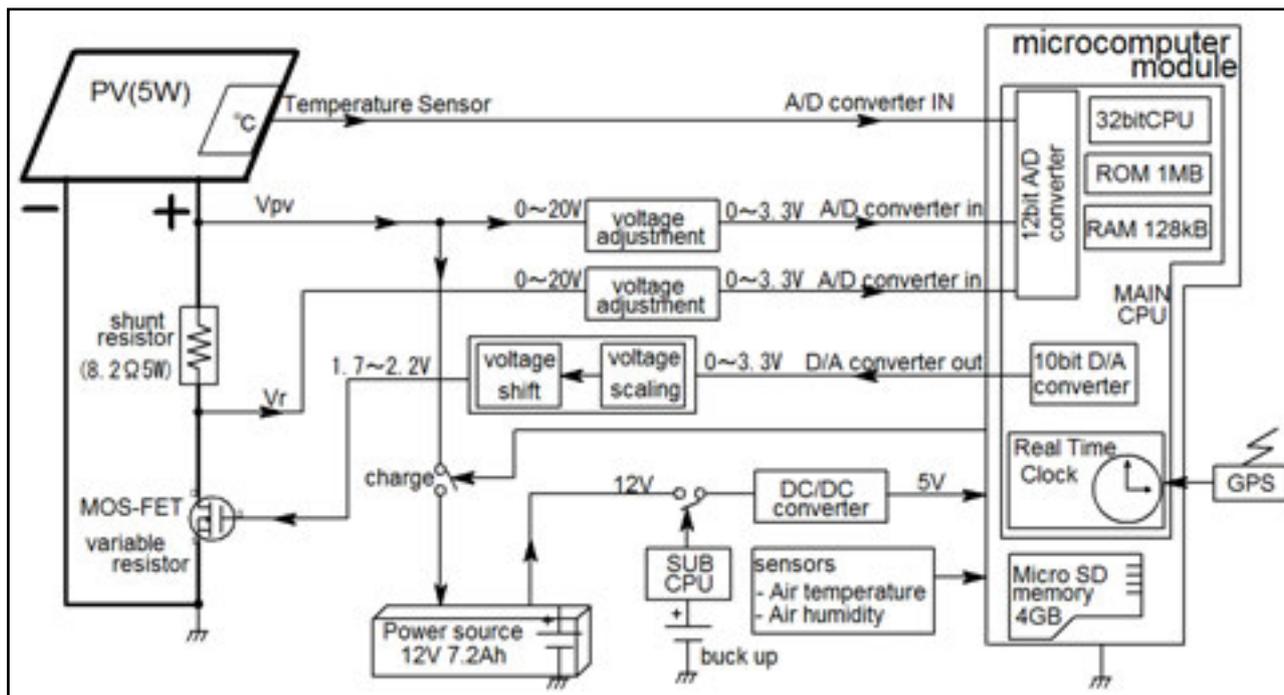


図3 測定装置のブロック図

表2 MOS-FET(2SK3142)の規格(一部) ²⁾

絶体最大定格	ドレイン・ソース電圧	30V
	許容チャンネル損失	35W
	チャンネル温度	150°C
電气的特性	ドレイン・ソース間	4.0mΩ (V _{GS} =10V)
	オン抵抗	5.5mΩ (V _{GS} =4V)
	ターン・オン遅延時間	50ns
	ターン・オフ遅延時間	560ns

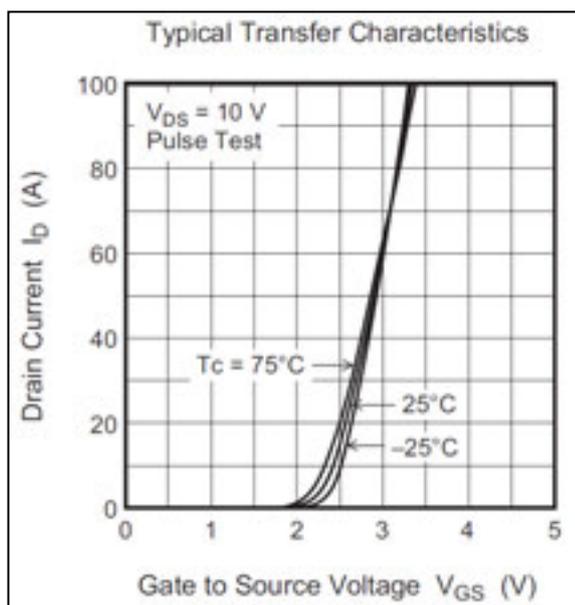


図4 MOS-FET(2SK3142)の V_{GS}-I_D 特性グラフ ²⁾

電圧、電流、電力などの観測データはマイコンユニット上の 4GB-SD メモリカードに時刻データとともに順次記録されていく。SD メモリカードは FAT 形式のフォーマットを用いており、書き込み終了後取り出してテキストデータとしてパソコンで読み取ることができる。

20:00 に省電力のためにメイン CPU 自身が、装置内のほとんどの電源をオフにする。これ以降、消費電力の少ないサブ CPU のみが動作を続け、翌朝 3:30 に電源を再投入する。

メイン CPU 内の時計 (Real Time Clock(RTC)) のみはバッテリーでバックアップされており、夜間も動作しているが、翌朝の起動直後に Global Positioning System (GPS) 衛星からの情報をもとに時計を補正している。衛星の補正時間は衛星の軌道などにより毎回異なるが、主電源投入後およそ 2 分以内に時計修正が終了する。これら電源起動時刻や RTC 修正の情報も SD メモリカードに記録される。なお、GPS からは時刻情報のほか、緯度・経度による位置情報等が得られるが今回は使用していない。

電源は定格 12V のシール鉛蓄電池を使用している。標準 7.2Ah の容量であるが、電池の種類や個数を変え 10Ah まで増設可能である。制御回路はほとんどが DC5V の動作である。電池の DC12V を DC/DC コンバータで 5V に変換して使用している。

日中は、30 秒周期で、太陽電池の出力データや各種のデータを測定し記録し続ける。測定/記録には、約 10~20 秒間かかる。残りの空き時間 (約 20~10 秒間) は、太陽電池から蓄電池への充電を行っている。太陽電池との接続には MPPT などの変換装置を設けず、スイッチとして

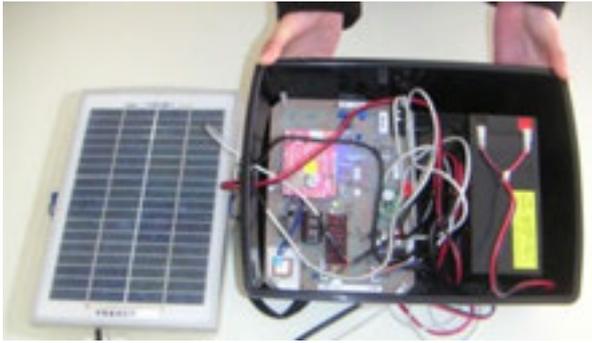


図5 測定装置内部

の MOS-FET を介して接続している。回路の簡素化を図るためであるが、図 3(b)からわかるように、太陽電池の最大電力出力時の電圧が約 15V であり電池の電圧 12V に近い値でもある。また、平均すると太陽電池から得られる電力は、蓄電池からの放電電力よりも少なく、過充電は発生しないため、特別な充電制御は行っていない。図 5 に測定装置内部の写真を示す。

2.3 その他のデータ採取機能

本測定装置は、下記に示すように、太陽電池の電圧や電流のほか、いくつかの項目を同時に測定し記録している。

- ①太陽電池電圧 (前述)
- ②太陽電池電流 (前述)
(実際の回路はシャント抵抗器の電圧を測定)
- ③太陽電池最大出力 (前述)
- ④外気温度 [°C]
- ⑤外気湿度 [%RH]
- ⑥太陽電池背面温度 [°C]
- ⑦CPU 温度 [°C]
- ⑧電源電圧 (電源用鉛蓄電池の電圧) [V]
- ⑨電子負荷設定電圧 (MOS-FET ゲート端子電圧) [V]
- ⑩電子負荷温度 (MOS-FET 表面温度) [V]

①～⑥は、太陽電池の特性を解析するうえで必要な項目であり、気象条件や太陽電池パネルの自己発熱の具合などを知る上で貴重なデータが得られる。

また⑦～⑩は本装置のメンテナンス上必要な項目である。MOS-FET の温度やゲート端子電圧は異常発熱や発火防止を考慮し監視を行っている。また、蓄電池の電圧監視は、無停電化を行う上で重要な項目である。電源電圧が大幅に低下した場合、太陽電池の計測を停止し、充電のみ行わせるなどの対処が可能となる。また、現時点では行っていないが、過充電の監視にも利用できる。

これら①～⑩の測定データは、すべて SD メモリカードに記録され、装置自体の動作解析などにも活用される。

2.4 日射計との比較

太陽光発電に関する予測技術においては、日射強度データをもとに議論される場合が多い。気象庁による広範囲な日射強度データの入手が容易なためである。また、日射強度と太陽電池出力は相関関係が強いことが予想される。一方、本論文による測定装置は、5W太陽電池の発電量を測定している。事前に、本測定装置による太陽光の発電量と日射強度の関係について比較を行った。図 6 に比較実験の様子を示す。

図 7(a)は、本測定装置を用いて測定した太陽光発電量とサーモパイル型日射強度センサによる測定データを比較したものである。また図 7(b)は、両者のデータを横軸、縦軸に配置し、相関を調べたものである。両者の相関係数は $R=0.992$ であり強い相関が認められた。両者の相関が強い点に着目することにより、過去の研究の日射強度データをもとに行った予測技術が太陽光発電の発電量予測にも利用できる可能性がある。

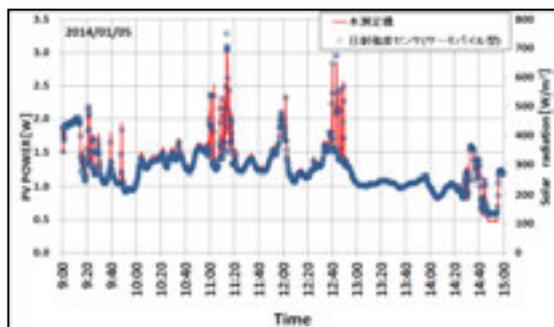
厳密には、太陽電池の光波長特性や温度特性など、気象条件によって相関の程度が異なるものと推察される。両者の関係が必ずしも一致しないことに着目し分析することにより、日射強度と発電量の関係がさらに明確になるものと思われる。

なお、ここで用いたサーモパイル型日射計は、太陽光のすべての光成分を一旦熱に変換し、熱電対で電圧に変換するセンサである。太陽光のほとんどすべての波長のエネルギーを考慮したセンサである。一方、応答速度が数秒から数十秒と遅く、一般的に高価という特徴を持っている。

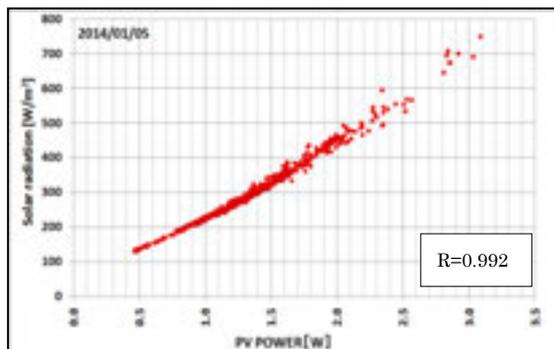
本測定装置は今回 30 秒周期での測定を行っているが、装置プログラムの変更で、さらに高速で測定できるため、雲の影響などをより確実にとらえることが可能である。



図6 日射計との比較実験



(a) 1日の時間変化 (サンプリング周期 30 秒)。



(b) 相関関係

図 7 太陽光発電量と日射強度の関係 (2014.1.5 東京都小平市)

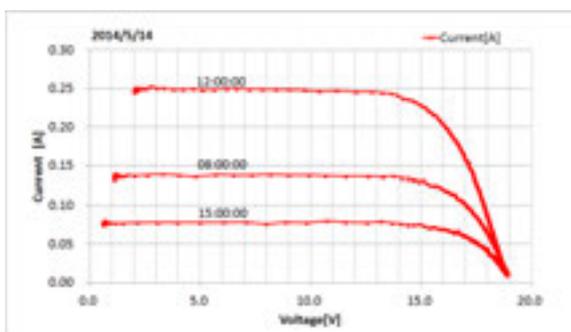
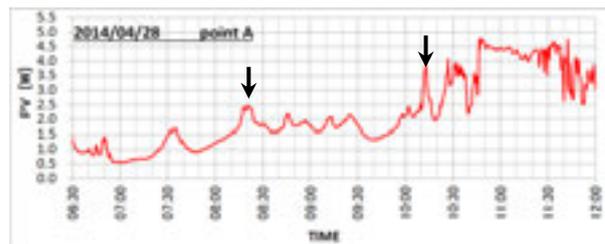


図 8 電圧－電流特性例 (時刻パラメータ表示) (2014.5.14 東京都小平市)

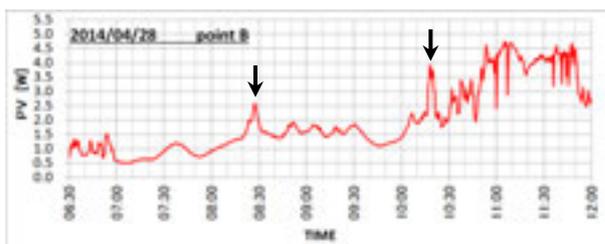
3. 測定データの解析

3.1 電圧－電流特性の測定

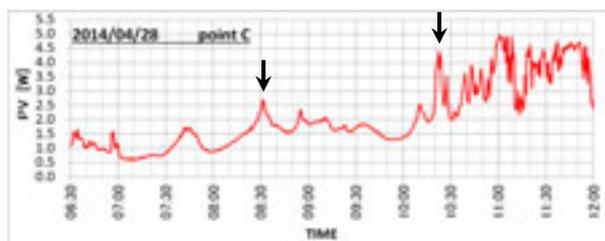
本測定装置は、30 秒周期で 512 組の電圧－電流測定を行っている。この特性は、太陽電池の動作状態を表している。太陽電池の発電量は日射角度やパネル温度などに依存することが知られている。図 8 は同一日の 3 種類の時刻ごとの電圧－電流特性を示したものである。太陽電池を水平で固定しているこの測定例では、大半が日射角度の違いによる影響であるものと推定できるが、太陽電池パネル温度などによる影響も含まれる。日射角度を理論計算して比較したり、温度の異なるパネルデータを比較したりすることにより、影響の大きさを評価することができる。



(a) A 地点



(b) B 地点



(c) C 地点

図 9 各地点から得た発電量の変化の例

3.2 各地点での測定データの関係

30 秒間隔で取得された電圧－電流特性を解析することにより、サンプリング周期 30 秒の最大発電電力の時系列特性を得ることができる。

図 9(a),(b)および(c)に、同じ日の異なる 3 か所の測定地点から得られた最大発電電力の測定例を示す。

3 か所の測定地点は、西から東に向かってほぼ一直線に A、B、C の順に配置されており、それらの間隔は A－B 間距離=7.1km、B－C 間距離=6.5km である。これらの測定波形を比較すると類似した点が多く見つけられる。3 地点は完全な一直線上には位置していないが、その類似した波形は数分から数 10 分程度の時間的なずれが生じている (図中の矢印部分など)。これは雲が西から東へ移動していることを示唆しており、日本の天候が西から東に徐々に変化する事実と一致する。この例からわかるように各地において綿密な発電量を測定することにより、地点間の相関が解析でき、ひいては、発電量の事前予測へと結びつけることが可能となる^{3,4,5)}。

例えば図中の 8 時台の電力ピーク点の時刻は、A 地点が 8:20、B 地点が 8:27 である。3 地点が一直線上にあるものとし、時刻と距離の関係を比例計算で求めると、C 地点のピークは計算上 8:33、が得られ、実測の 8:31 と近い値になる。この例は電力ピーク点に着目した場合であ

るが、この手法を利用し未知の地点での発電量予測へ応用できる。雲の形状、雲の移動方向、雲の速度の変化、なども考慮すれば精度の向上が期待できる。

4. 本測定装置の問題点・今後の課題

4.1 サンプルタイムの検討

実際に電力データを採取すると、電力値の著しい変化が観測される場合がある。現状においては、データ処理の段階で移動平均計算などを行い、波形の平滑を施すことで対処しているが、本装置で採用した 30 秒のサンプルタイムの妥当性について検証する必要がある。

4.2 充電電力の不足への対処

太陽電池を 1 台装備した本装置では、太陽電池は、発電量測定センサとして動作しているほか、計測の空き時間を利用して、装置内の電源用蓄電池への充電も行っている。しかし、本装置では充電量が放電量に対し不足しており電池の電圧が徐々に低下する傾向があり、データの回収時に蓄電池の交換を行っている。今後、ソフトウェアの改良や、ハードウェア上の省電力化などの対策が必要である。

4.3 通信機能の追加

現時点では本装置は、データの回収をメモリにより行い、事後解析を行っている。本装置では Wi-Fi による通信機能が搭載できる設計となっているが、データの圧縮や通信経路については未検討である。発電予測を実システムにおいて活かすには、リアルタイムによるデータ解析が不可欠であり、通信機能を充実させる必要がある。

5. まとめ

再生可能エネルギーの活用は、脱化石エネルギー、地球温暖化対策などの目的でさらに注目され続けている。太陽電池を用いた太陽光発電は、機械的可動部分がほとんどなく、その結果、設置やメンテナンスが容易であり、騒音がほとんどないことから、一般家庭に導入しやすいという利点がある。しかしながら欠点もある。それは、日中しか発電できないという点に加え、予期しない突然の天候変化で発電出力が変化するという点にある。有効な解決策は蓄電であり、電気自動車の存在も注目されているものの、普及にはさらに時間を要するものと思われる。別の手法で太陽光発電を効果的に使用するには、需要電力を調整したり、影響を事前に予測し他の発電装置（ガスタービン発電等）で補完するという運用方法が

考えられる。本装置は、予測データのもととなる太陽光発電の発電量データを採取する目的で開発した。データは予測技術の検討に用いることができることを確認した。今後は、通信機能を拡充させるなど、装置の省保守化と機能の充実化を図り、予測手法の確立とその効果について検証を行っていく予定である。

参考文献

1. 日高和弘、篠田幸雄、岡本知樹:太陽光発電システムの広域的出力実績の推定方法に関する一考察、2014 電気学会論文誌 B,Vol.134,No6, pp.477-483(2014)
2. http://japan.renesas.com/products/discrete/pmofet/gen_sw/device/2SK3142.jsp
3. 小林浩昭、荒井純一:他の地域の発電量データを利用した太陽光発電の短期予測、2014 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会 pp.119-124(2014)
4. Hiroaki Kobayashi, Junichi Arai: *Short-term Forecast for Photovoltaic Power Generation with Correlation of Solar Power Irradiance of Multi Points*, World Scientific and Engineering Academy and Society 14th International Conference on ELECTRIC POWER SYSTEMS, HIGH VOLTAGES, ELECTRIC MACHINES pp.89-94 (2014)
5. Hiroaki Kobayashi, Junichi Arai: *Short-term Forecast for Photovoltaic Power Generation and Development of Measuring Equipment*, 7th International Conference on Information and Automation For Sustainability(2014)

(原稿受付 2015/3/24、受理 2015/5/29)

*小林浩昭、修士 (工学)

職業能力開発総合大学校、〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: kobayashi@uitech.ac.jp
Hiroaki Kobayashi, Polytechnic University,
2-32-1 Ogawa-NishiMachi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*南川英樹、学士 (工学)

職業能力開発総合大学校、〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: Minamikawa.Hideki@jeed.or.jp
Hideki Minamikawa, Polytechnic University,
2-32-1 Ogawa-NishiMachi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*市川修、博士 (工学)

職業能力開発総合大学校、〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: o.ichika@uitech.ac.jp
Osamu Ichikawa, Polytechnic University,
2-32-1 Ogawa-NishiMachi, Kodaira, Tokyo 187-0035