

# 反射板方式太陽光追尾型発電装置に関する調査研究

## ～日射量予測と発電実績について～

Study on the Photovoltaic Generation System Suitable for Sun Direction Installed Reflector  
～Prediction of solar irradiance on PV panel and results of power generation～

齋藤 健二<sup>1)</sup>

Kenji SAITO

依田 浩敏<sup>2)</sup>

Hirotoishi YODA

Abstract : When the photovoltaic generation system suitable for sun direction installed reflector was designed, the solar irradiance on PV panel by a fixed method and a tracking one was calculated. Moreover, the installation angle installed the upper and lower side reflector, the reflected solar radiation, and the shadow length were calculated. As a result, it is cleared that the tracking is effective on the clear days except at noon, the best angle installed upper reflector is from 20 to 30 degree, and the one installed lower reflector is 60 degree. The measuring data was obtained from September 2009 to February 2010 except for the period in bad condition of instruments and in unseasonable weather. As a result, an actual measurement of power conversion efficiency of PV panel was obtained from measuring data in February 2010 when the PV panel was fixed in the direction to directly south.

キーワード : 太陽光発電、太陽光追尾、反射板、日射量予測

Keywords : photovoltaic generation, sun tracking, reflector, solar irradiance

### はじめに

太陽光発電は自然エネルギー利用に関して、近年最も期待を集めている分野である。過去に日本は世界一の普及率を誇っていたが、数年前にドイツにその座を明け渡した。しかしながら太陽光で発電した電力の買い取り価格を従来のほぼ倍という政策支援により急速に普及率が再び拡大してきている。太陽エネルギーの特徴として、そのエネルギー密度が小さく(宇宙空間で約 $1.36\text{kW/m}^2$ )間欠性や電力変換効率が小さいために、ある程度広い設置面積が必要でコスト高の要因となっている。

太陽光発電を普及させるためにはコスト削減が急務であるが、そのためのアプローチとしては、今述べた政策以外に太陽電池そのものの効率向上や集光効率向上による見かけ上の単位面積当たり発電量の増強が必要である。

平成20年度に飯塚市の補助事業および産業理工学部の教育プロジェクトの一環として学部内に小規模の太陽光発電装置を設置させて頂いた。このたび一部の運転結果が得られたので事前に予測した検討結果とともに報告をするものである。

### 1. 集光による効率向上

集光による効率向上としては、以下の方法がある。

- ①反射板を設け集光を図る。
- ②集光レンズを用いて集光を図る。
- ③太陽の高度を自動追尾して太陽高度が低いところの集光を図る。

本研究では、現状の太陽電池に反射板を設け、さらに太陽光の方位角を追尾することにより事実上の出力増大を図り、実用化を目指すことを目的としたものである。

試作機では、反射板としてSUS304 2Bを使用した。また、太陽光の追尾は、設置場所の緯度・経度から年間の日の出から日没まで10分間ごとの方位角度を計算し、横方向に回転させるものとした。

### 2. 計測システムの概要

太陽光発電パネル面の日射量測定はパネルと同じ傾斜面、方位に取り付けた日射量計を用いて行った。測定間隔はデータ収集の頻度と記録容量を考慮して10分間隔とした。電圧、電流の測定箇所は太陽光パネルからコントローラーへの流入地点およびバッテリーからの流出地点である。それぞれの電流測定は特注したクランプメータを介してその発生電圧をデータロガーに、それぞれの電圧測定は直接にデータロガーに接続して行った。

太陽光発電装置および計測システムの全体構成を図-1に

1) 近畿大学産業理工学部建築・デザイン学科 教授 ksaito@fuk.kindai.ac.jp

2) 近畿大学産業理工学部建築・デザイン学科 教授 yoda@fuk.kindai.ac.jp

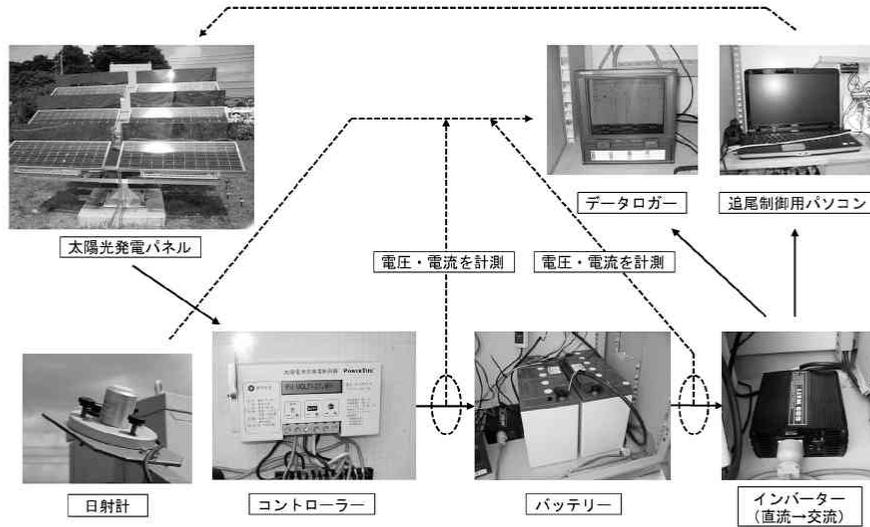


図-1 太陽発電装置および計測システム

示す。

### 3. 固定方式と追尾方式によるパネル面日射量の比較

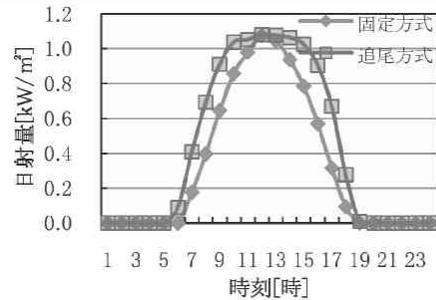
財団法人建築環境機構の開発した住宅用熱負荷計算プログラムに収録されている年間気象データを用いて太陽光発電パネルの受光面日射量をコンピュータシミュレーションにて算出した。

計算条件は下記のとおりである。

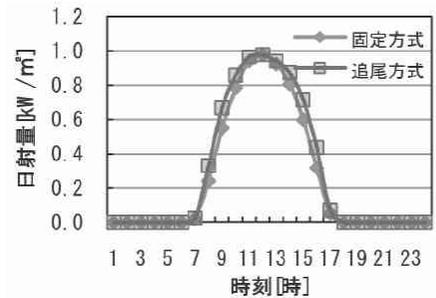
- ①パネルの設置角度  $\alpha = 30^\circ$  (水平から)
- ②パネルの設置方位角 (固定方式)  $\phi = 0^\circ$  (真南)  
 パネルの設置方位角 (追尾方式) 太陽方位角と同じ
- ③気象データ地点 福岡

固定式と追尾式の場合のパネル受光面の日射量比較についての一例および年間を通した比較を図-2に示す。

日射の強い快晴日 (5月16日) は南中時以外 (もともと南中時はパネル面が太陽に向いている) に効果が出ている。同じ快晴日でも秋から冬にかけて (10月22日) は追尾の効果は小さい。



(5月16日)



(10月22日)

### 4. 反射板を設置した場合の日射量 (追尾方式)

#### 4.1 反射板設置時の計算概要

反射板を設置した場合の反射板設置角度、パネル設置角度、太陽高度などの諸関係を図-3に示す。反射光によるパネル面への日射は図中に示した、みかけの太陽から日射があたると考える。このときみかけの太陽に対するパネルの設置角度は  $360 - \beta$  となる。

ここに、

- $\alpha$  : パネル設置角度(水平面からの角度で左回りを正) [度]
- $\beta$  : 反射板設置角度(垂直面からの角度で左回りを正) [度]

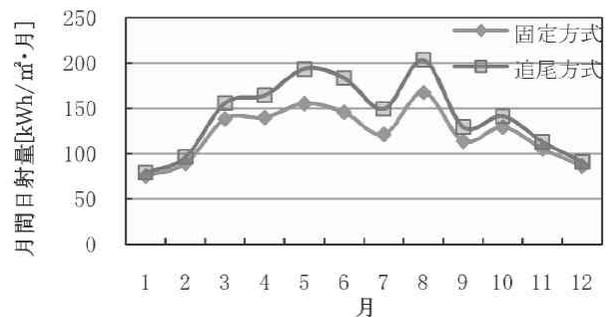


図-2 固定式と追尾式のパネル面日射量の比較

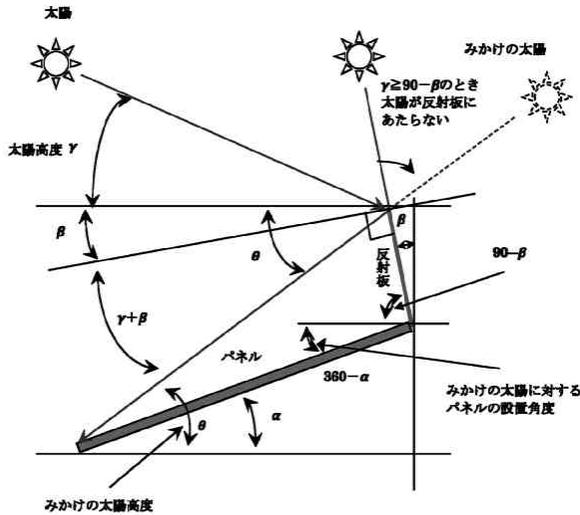


図-3 太陽高度、パネル設置角度、反射板設置角度の関係

$\gamma$  : 太陽高度 [度]  
 $\theta$  : みかけの太陽高度 [度]

追尾方式に反射板を設置したときの反射光によるパネル面日射量を下記の条件で算出した。

- ① 日射量は太陽からの直達日射のみ考慮し、天空日射は無視する。
- ② 太陽高度  $\gamma$  が、 $\gamma \geq 90 - \beta$  のとき、反射板に日射があたらないので反射板による効果はない。
- ③ ②の場合、反射板による影はパネルにあたらないものとする。
- ④ 反射光はパネル全面にあたるものとする。
- ⑤ 反射板の反射率は0.8とする。

#### 4.2 上部反射板の設置角度の検討

上記の条件により計算した結果を図-4～図-6に示す。

5月9日の例では11時過ぎから13時にかけて太陽高度が高く、反射板に日射があたらないことがわかる。

反射板の設置角度は年間を考えた場合、20度～30度が最適であると推定できる。

#### 4.3 追尾方式における反射日射と影の長さの検討

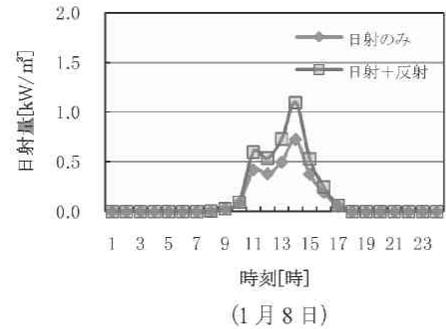
パネルにあたる反射光の長さは、式(1)で算出される。

ここに、

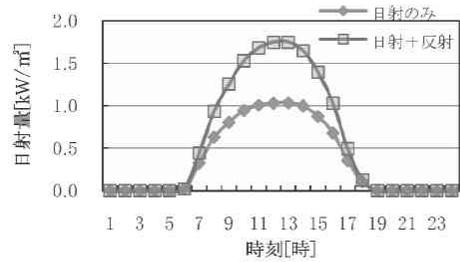
$$w = h \left\{ \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\tan(\gamma + 2\beta - \alpha)} - \sin(\alpha - \beta) \right\} \dots\dots (1)$$

$w$  : 反射光の長さ [m]

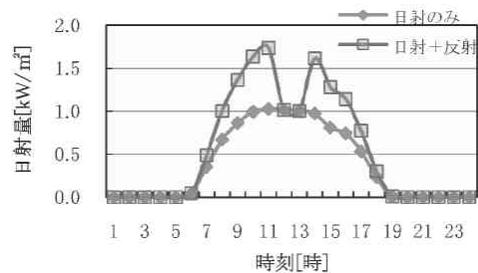
$h$  : 反射板の高さ [m]



(1月8日)



(4月19日)



(5月9日)

図-4 パネル面の日射量比較 (反射板角度=20度)

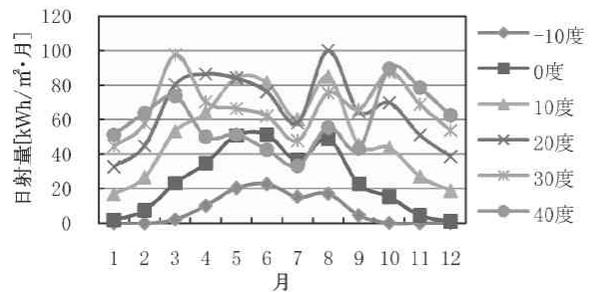


図-5 反射板角度による月別日射量の比較

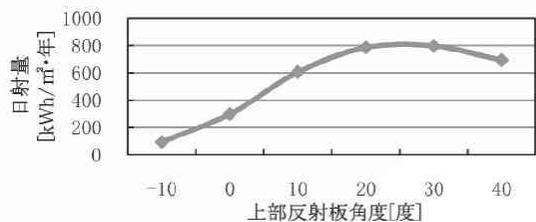


図-6 反射板角度による年間日射量の比較

- $\alpha$  : パネル設置角度 [度]
- $\beta$  : 反射板設置角度 [度]
- $\gamma$  : 太陽高度 [度]

また、パネルの設置間隔 $p$ は、式(2)で算出される。

$$p = \frac{h \left\{ \frac{\cos(\beta)}{\tan(\gamma)} - \sin(\beta) \right\}}{\sin(\alpha) \left\{ \frac{1}{\tan(\alpha)} + \frac{1}{\tan(\gamma)} \right\}} \dots\dots (2)$$

ここに、

- $p$  : パネルの設置間隔 (m)
- $h$  : 反射板の高さ (m)
- $\alpha$  : パネル設置角度 (度)
- $\beta$  : 反射板設置角度 (度)
- $\gamma$  : 太陽高度 (度)

太陽高度を基に、太陽を追尾した場合の太陽光パネルにあたる反射日射の長さ $w$ および反射板による影の長さ $p$ を計算した。代表日の計算結果を図-7に示す。但し、計算条件は太陽高度、パネルの傾斜角、反射板角度、反射板高さのみで気象データとしての日射量は考慮していない。

#### 4.4 下部反射板の検討

パネルの下部に反射板を取り付けた場合の、パネル面にあたる反射光の長さ $w3$ は式(3)で算出される。

$$w3 = g \left\{ \frac{\cos(\alpha - \theta)}{-\tan(\gamma + 2\theta - \alpha)} + \sin(\alpha - \theta) \right\} \dots\dots (3)$$

ここに、

- $w3$  : パネル面にあたる下部反射光の長さ [m]
- $g$  : 下部反射板の高さ [m]
- $\alpha$  : パネルの設置角度 [度]
- $\theta$  : 下部反射板の設置角度 [度]
- $\gamma$  : 太陽高度 [度]

$\gamma \leq 90 - \theta$  のときは下部反射板に日射があたらない。  
 下部反射板によるパネル面への月間および年間日射量を、設置角度を変化させて推算した結果を図-8、図-9に示す。下部反射板の設置角度 $\theta$ が小さいと、秋から冬にかけてはほとんど効果のないことがわかる。

図-9から最適設置角度は、 $\theta = 60$ 度前後と推定できる。

次に太陽高度を基に太陽を追尾した場合のパネル面にあたる反射日射の長さ $w$ を計算した。

計算条件は下記のとおりである。

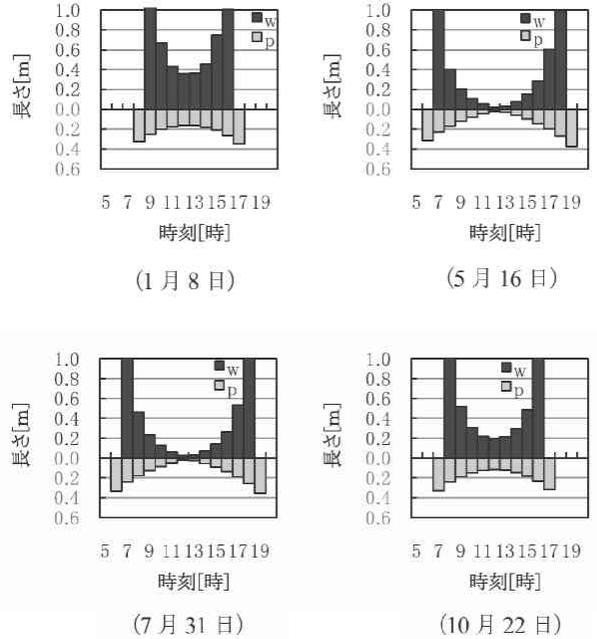


図-7 反射日射の長さ $w$ と影の長さ $p$

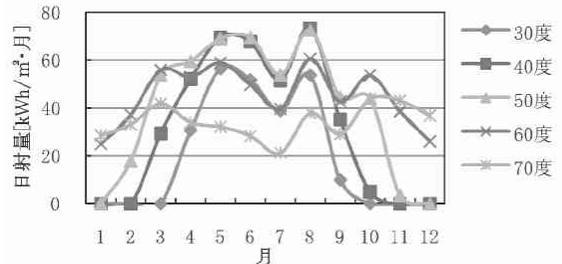


図-8 下部反射板角度による月別日射量の比較

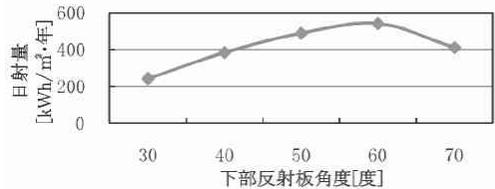


図-9 下部反射板角度による年間日射量の比較

- ① パネル傾斜角 : 30度
- ② 下部反射板角度 : 60度
- ③ 下部反射板高さ : 0.4m

計算結果の一例を図-10に示す。但し、計算条件は太陽高度、パネルの傾斜角、反射板角度、反射板高さのみで気象データとしての日射量は考慮していない。パネル下部に設置した反射板の特性は先に示したパネル上部の反射板の特性と逆の特性を示し、互いに反射日射を補うような効果を

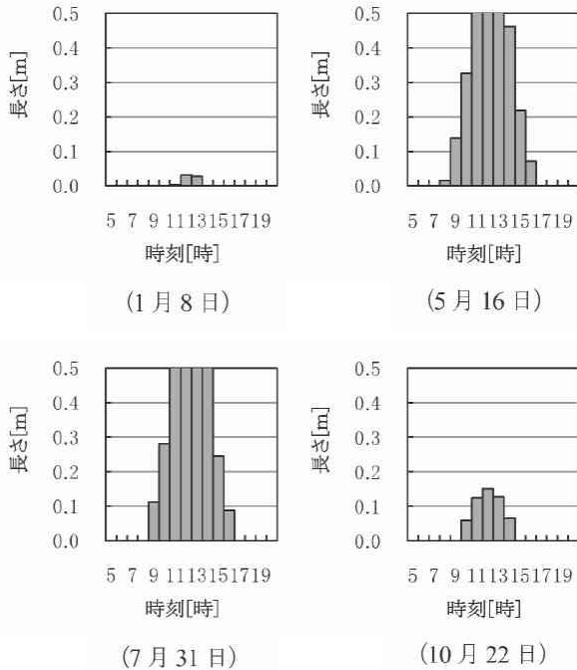


図-10 下部反射板による反射日射の長さ

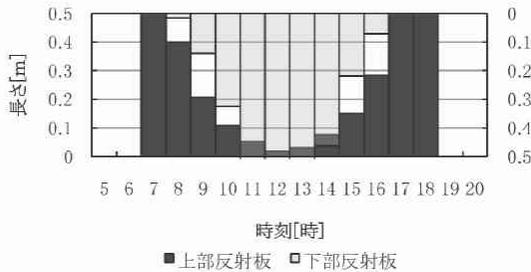


図-11 上下反射板の効果

示しているのがわかる。(図-11)

## 5. 測定結果

### 5.1 日射量の測定結果

2009年9月11日～2010年2月24日におけるパネル面の日射量測定結果を図-12に示す。

### 5.2 電圧・電流の測定結果

2009年9月13日～9月30日におけるパネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化を図-13に示す。パネルおよびバッテリーの電圧・電流の定義は次のとおりである。

- ①パネル電圧……太陽光パネルの発生電圧 [V]
- ②パネル電流…太陽光パネルからバッテリーへ流れる電流 [A]
- ③バッテリー電圧…バッテリーの電圧 [V]
- ④バッテリー電流…バッテリーから負荷へ流れる電流 [A]

計測を始めた当初は電流計測のために小型のクランプ計を用いたが、電池容量が2日程度しか持たず、電流計測はほとんど実施できなかったため、後に特注したクランプメータを採用した。

パネル電圧は日射のない夜間は当然ほぼ無電圧を示しているが、昼間は日射が弱くても25V程度発生していることがわかる。パネル電圧が30Vを超えてもバッテリー電圧はほぼ30V以下で推移しているが、これはコントローラーの働きによるバッテリー保護のためと思われる。

クランプメータの取替えおよびその他の調整のために10月中旬まで計測を中止し、10月17日から計測を再開した。

2009年10月17日～11月30日におけるパネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化を図-14、図-15に示す。10月21日夜から22日にかけて一部データの欠測がある。計測期間

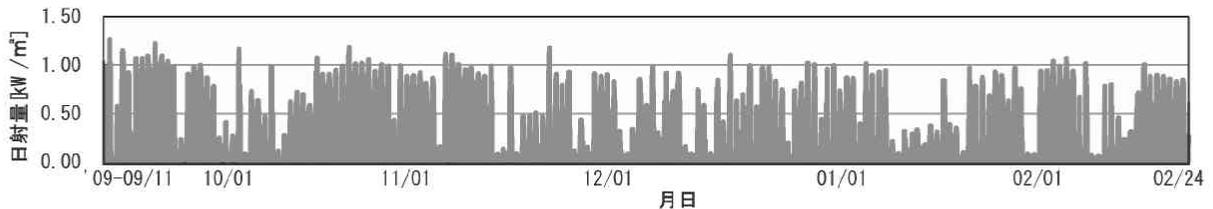


図-12 太陽光パネル面日射量 (2009年9月～2010年2月)

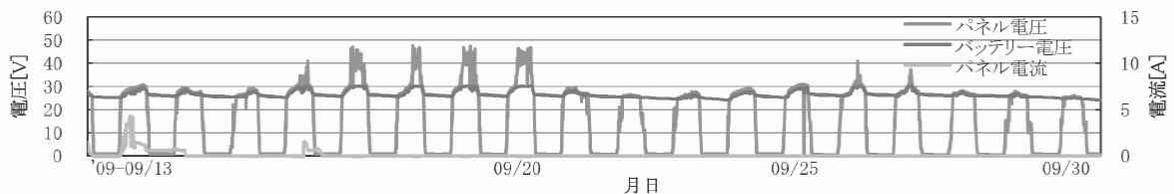


図-13 パネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化 (2009年9月)

中は日射量も安定しておりデータは順調に収集できた。バッテリーから供給する負荷電流は追尾制御用のパソコンとデータロガーである。この負荷電流はほぼ一定に推移しているのがわかる。

11月13日夕方からバッテリーの電圧が低下してパソコンが停止し太陽光パネルの追尾制御ができなくなった。当該期間の日射量(図-12)を見ると11月10日～13日の期間は12日を除いてほぼ日射がない状況である。このためにバッテリーへの充電ができずにバッテリー電圧が低下したと考えられる。この期間の詳細を図-16に示す。

パソコンの再起動を数回試みたが状況は同じであった。

追尾用のパソコンは24時間稼動しており、日射のない夜間は稼動する必要がないので停止することを考える必要がある。2009年12月1日～14日におけるパネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化を図-17に示す。12月も日射

の弱い期間が続きパソコンが停止することが多くなった。図中のデータ欠測はその状況を示している。2009年12月14日以降も日射量不足によりパソコンが順調に稼動せず、2010年1月中旬まで測定データは間欠にしか得られていない。2010年1月16日～1月31日におけるパネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化を図-18に示す。1月21日でパソコンによる追尾制御を停止し、パネル方位を真南に固定して再度計測を開始した。バッテリーからの負荷電力はデータロガーのみになり順調に測定データが収集できた。

2010年2月1日～2月24日におけるパネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化を図-19に示す。2月10日から一週間は日射量がほとんどないが、バッテリー容量を倍増したこともあって順調なデータが得られた。

これらの測定結果から日射量が少なく、追尾効果の小さい晩秋から早春にかけての冬季は追尾制御を停止して太陽

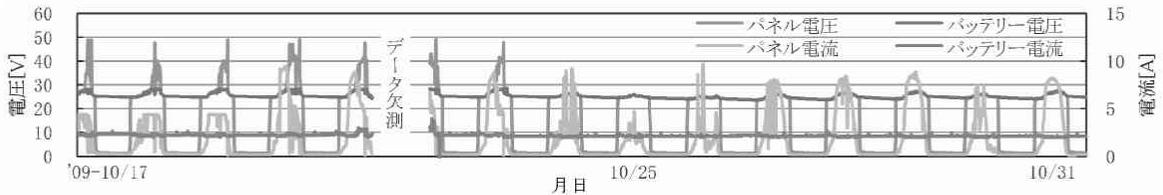


図-14 パネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化 (2009年10月)

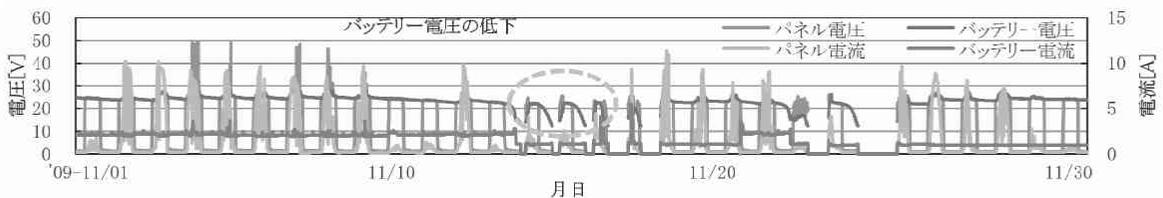


図-15 パネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化 (2009年11月)

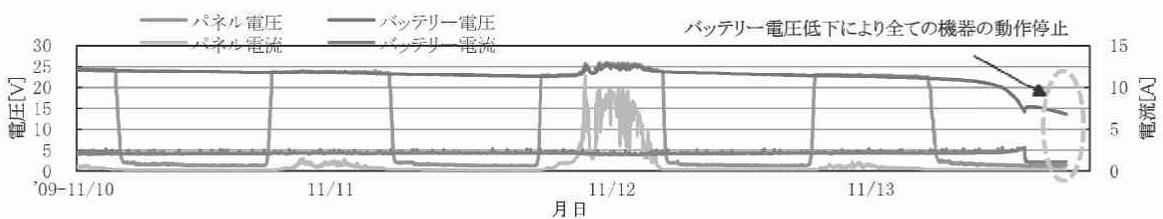


図-16 2009年11月10日～13日の経時変化の詳細

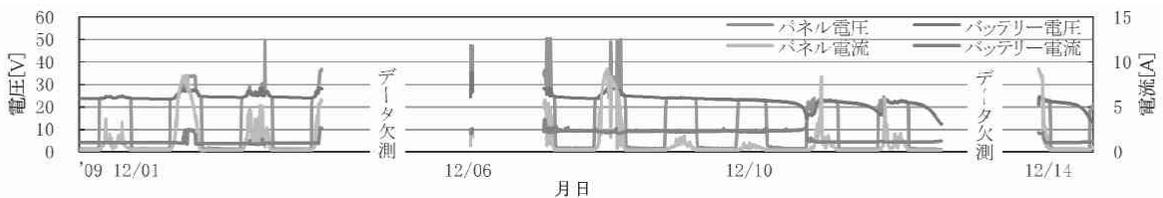


図-17 パネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化 (2009年12月)

光パネルを真南向きに固定するのも一考の余地がある。これは図-2の追尾効果シミュレーション結果からも推測できる。またバッテリー容量を把握して日射量不足が続いた場合には追尾制御を停止し、バッテリー容量が回復すれば追尾制御を再開するなど、インテリジェントな判断を伴う制御も必要になってくる。

### 5.3 バッテリーへの入力電力と消費電力

2010年2月1日～24日におけるパネルからの発生電力とバッテリーからの消費電力について瞬時値の経時変化を図-20に示す。また一日単位で積算したそれぞれの電力量の経時変化を図-21に示す。月間単位におけるバッテリーへの入力電力に対する消費電力の比は0.816となった。

### 5.4 パネルの電力変換効率実績値

2010年2月の測定データから一日単位における太陽光パネルの電力変換効率を求めた。ここでの電力変換効率とはバッテリーへの入力電力量[kWh]を日射量[kWh]で除した値である。その結果を図-22に示す。電力変換効率の実績値は最大値が16.3%、最小値が8.2%、期間平均値が9.9%であった。太陽光パネルの仕様によれば変換効率は約14%であり、実績値の平均はこの値をかなり下回っている。図-22から実績値は日射量が小さいときは大きく、日射量が小さいときは大きくなっているのがわかる。変換効率低下の原因として日射量が多い場合、バッテリー保護のために過充電を防止する制御が働いてコントローラーからバッテリーへの電力供給が遮断されるため、コントローラーでの損失、パネル表面の温度上昇、パネル表面の汚れ、などが

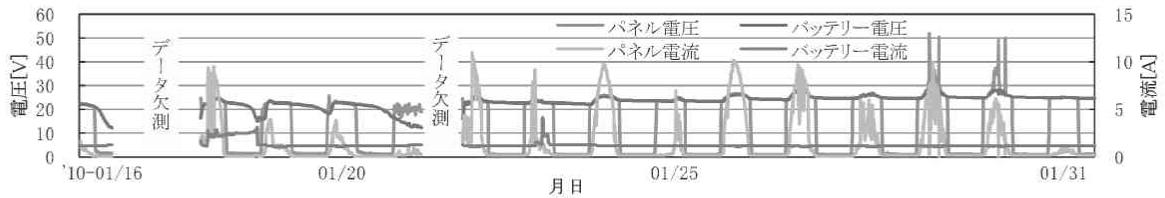


図-18 パネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化（2010年1月）

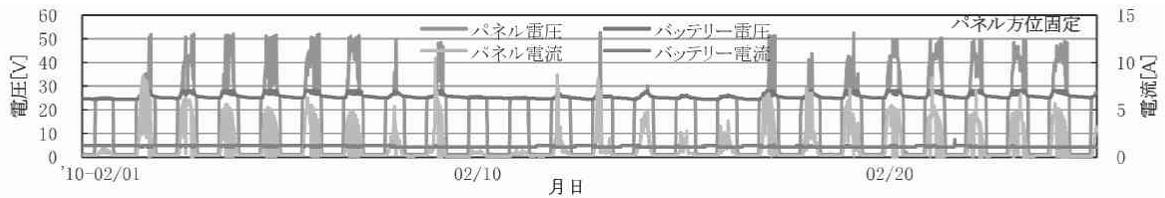


図-19 パネルおよびバッテリーの電圧・電流の経時変化（2010年2月）

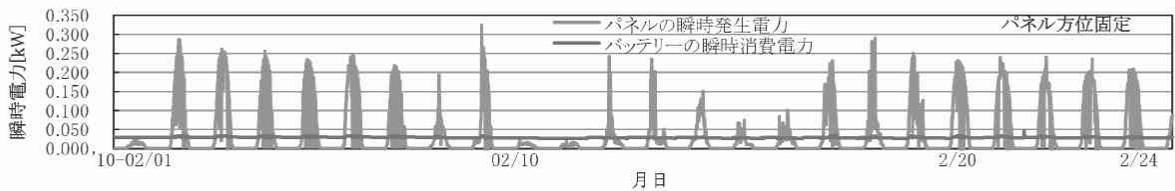


図-20 瞬時発生電力と瞬時消費電力の経時変化（2010年2月）

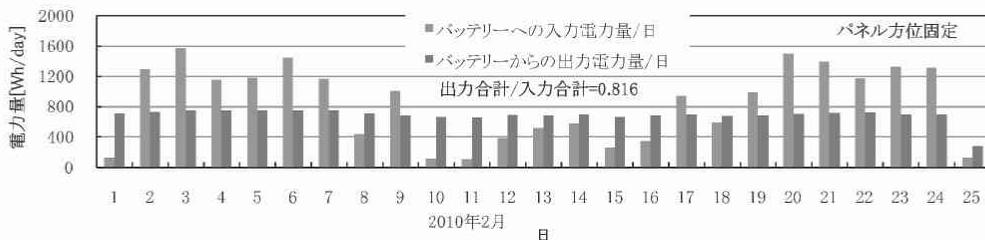


図-21 バッテリーへの入力電力と消費電力（2010年2月）

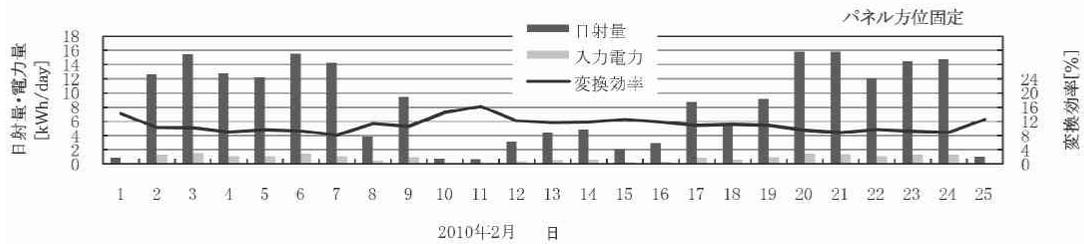


図-22 日射量とバッテリーへの入力電力および変換効率 (2010年2月)

考えられるが今後詳細な分析が必要である。さらに、発生した電力をその都度消費しつつ、機器の基本動作に必要な最低限の電力を確保するような、発電能力、バッテリー容量、負荷電力の3者間のトータルバランスが重要になってくる。電力網で注目を集めているスマートグリッドに似た考えである。

## 6. 今後の検討事項

平成21年度の計測は機器の不調とバッテリー容量の不足から十分なデータ収集ができなかったが、現在はバッテリー容量を2倍にしているので、追尾式の連続したデータ収集ができるものと考えている。追尾制御用パソコンについては前述したように夜間の停止を考える必要があるが、別途、消費電力の少ないシーケンシャル機器による制御も検討の余地がある。さらに、今回実施できなかった固定式と追尾式の実績比較や反射板の効果、パネル表面温度による変換効率への影響などについてもデータ収集と分析を進めていきたいと考えている。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、江口英範氏（ソフィアエンジニアリング株式会社）にご助力をいただいた。また、平成20年度飯塚市大学支援補助金、ならびに、近畿大学産業理工学部教育研究プロジェクトによることを付記する。