

寺社建築を対象とした太陽光発電の開発

佐藤 康弘・齋藤 正文・森 直樹

Keywords : Photovoltaic cell , Photovoltaic electricity generation , Temple , Roof tile , Architectural appearance

太陽電池、太陽光発電、寺社建築、日本瓦、景観

1. 開発経緯と目的

地球温暖化問題への世界的な取り組みが進む中、太陽光発電で代表される新エネルギーは、CO2等の排出が少ないため環境へ与える負荷が小さいこと、資源制約が少ないクリーンな国産エネルギーであることから、その導入促進が大きく期待されている。一方で、「気候変動枠組条約第3回締約国際会議」通称COP3でも先進国に対し、温室効果ガスを1990年比で、2008年から5年間で一定数値（日本6%、米7%、EU8%）を削減することを義務づけられ、我が国では、各産業分野において独自に削減目標を設定し実現に向け努めている。このような社会情勢の中で、日本での太陽光発電の導入実績は、2000年度末で約31.7万kWであるが、2010年度時点で約482万kWの導入目標を掲げている。また、太陽光発電の普及を支えているものとして、新エネルギー財団（NEF）の補助制度がある。2003年度は1kW当たり9万円の設置補助金が最高10kW分まで支給される。その他、地方自治体の補助制度や低利融資制度などがあり、今後太陽光発電は、ますます普及していくものと想定される。

こうした状況の中、本瓦を有する寺社建築においては、一般住宅に比べて屋根面積が広い、大半の寺社建築は南向きに設置されている、屋根の勾配は15°～45°である、という太陽光発電にとって好条件の屋根を有しているにも関わらず、太陽電池パネルは、伝統的な瓦のデザインとマッチしないという理由で実用化された事例は少ない。

本報では、寺社建築の屋根材である本瓦の景観を維持しながら、現在の発電効率を極力損なわない太陽電池モジュールの技術開発を行った結果について述べる。

2. 市販されている太陽電池の調査

開発にあたって、イニシャルコストの増額を極力抑えるために、寺社建築の屋根の景観を損ねることなく設置が可能な市販されている太陽電池の調査を行った。その結果を表-1と表-2に示す。

表-1 シリコン半導体を材料とした太陽電池の種類

Types of Photovoltaic cells made from silicon semiconductor

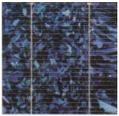
種類	発電効率	特徴	色	写真
単結晶	14～17%	<ul style="list-style-type: none"> 豊富な使用実績と信頼性がある。 表面は単一色である。 電池はシリコンの結晶を並べてつくる発電素子の表面をガラスで覆い保護されている。 電池の出力は部分的な影の影響を受けやすい。 高温になるほど発電効率が低下する。 	黒色	
多結晶	12～14%	<ul style="list-style-type: none"> 大量生産向きで信頼性がある。 表面にシリコンの結晶模様が現れる。 電池はシリコンの結晶を並べてつくる発電素子の表面をガラスで覆い保護されている。 電池の出力は部分的な影の影響を受けやすい。 高温になるほど発電効率が低下する。 	青色 紺色 灰色 緑色 濃茶色 茶金色 金色	
アモルファス	6～9%	<ul style="list-style-type: none"> 電池は基材の上にシリコンを蒸着させて表面を薄い保護層で覆っている。 薄膜セルを使用しているため曲げることができる。 電池の出力は部分的な影の影響を受けにくい。 高温になっても発電効率の低下が小さい。 	茶褐色 ワインレッド	

表-2 生産量上位3社による太陽電池モジュールの比較
Comparison of Photovoltaic modules made by three leading companies

メーカー	セルの種類	主要モジュール寸法(mm)
S社	結晶型	1200×802
K社	結晶型	713×885
S社	ハイブリッド型 (結晶とアモルファス)	1365×345

調査の結果、アモルファス太陽電池は、結晶型の太陽電池と同等の発電量を維持するには、より多くの面積が必要であること、市販されている太陽電池は、各社コストダウンのために全てサイズが規格化されており、そのため本瓦のサイズ(約300×300mm)と同じサイズの太陽電池モジュールは市販されていないことがわかった。

3. 開発コンセプトと試作 Ver.1

3.1 開発コンセプト

寺社建築の屋根には、主に本瓦が使われている。本瓦とは、丸瓦と平瓦で構成され1組の寸法は、約300×300mmである。写真-1に示した例は、施工を簡便化するために平瓦と丸瓦を一体化した瓦である。



写真-1 一体化した本瓦の形状
Shape of "HONKAWARA" roof tile

この本瓦を使った寺社建築の屋根の景観を維持するために、図-1に示す3つの方法を考えた。

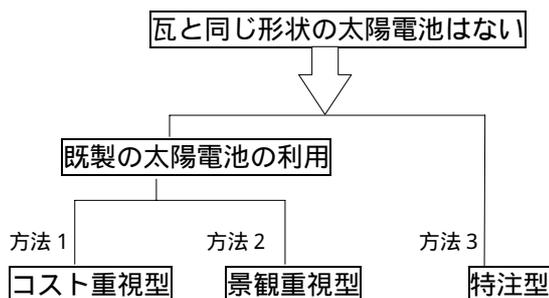


図-1 屋根の景観を維持するための3つの方法
Three methods for maintaining the architectural beauty of tiled roofs

次に各コンセプトの特徴を示す。

方法1では、本瓦2列分の幅に近い形状の太陽電池モジュールを選定し、図-2に示すように瓦2列分に設置する。瓦は、太陽電池モジュールの部分には設置しない。この場合の利点は、最も作業効率が良くしかも安価に設置することができることである。問題点は、外観をやや損なうことである。

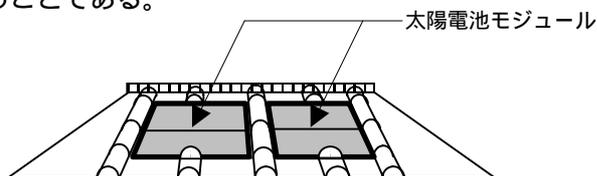


図-2 太陽電池モジュール設置方法1
Photovoltaic module installation method 1

方法2では、方法1と同様に本瓦2列分の幅に近い形状の太陽電池モジュールを選定し、図-3に示すように瓦2列分に設置する。更に太陽電池モジュールの上に丸瓦を載せる。この場合の利点は、方法1と比較して丸瓦を使用することで景観を維持したことである。問題点は、太陽電池モジュール上に丸瓦を設置することが難しいこと、太陽電池モジュールの一部に丸瓦があるので常に発電量が低下することである。

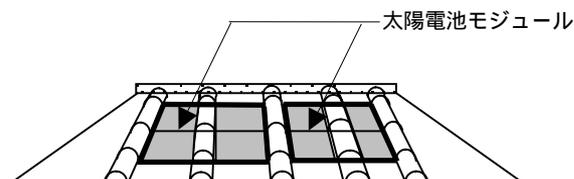


図-3 太陽電池モジュール設置方法2
Photovoltaic module installation method 2

方法3では、本瓦の平瓦と同じ幅のサイズで特注した太陽電池モジュールを設置した場合である。この場合の利点は、3つの方法の中で一番景観を損なうことなく設置することができ、発電効率の低下を防ぐことができる。問題点としては、サイズを限定した特注なので製造コストが上がることである。

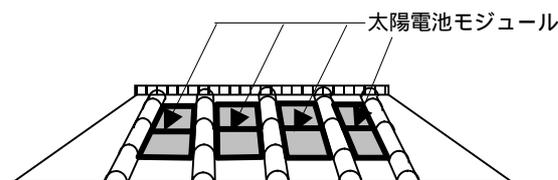


図-4 太陽電池モジュール設置方法3
Photovoltaic module installation method 3

3.2 試作 Ver.1

本瓦の景観を維持しながら太陽電池を設置するという今回の目的を重視して、図-4 に示す方法3の試作を行った(試作 Ver.1)。その試作 Ver.1 を写真-2 に示す。

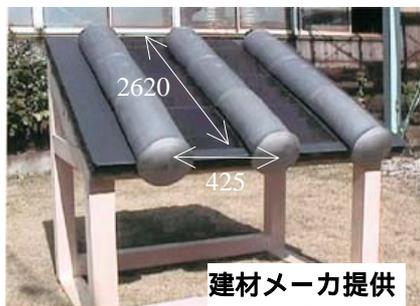


写真-2 試作 Ver.1 全景写真
Appearance of the trial sample Ver.1

試作 Ver.1 は、屋根を模擬した架台の上に 2620mm × 425mm の太陽電池モジュールを縦方向に 2 列、平瓦部分に設置している。平瓦を複数連結した形状の太陽電池モジュールとした。丸瓦は、市販の実物を使用している。

この太陽電池モジュールは、金属製のバックシートにアモルファスシリコンを蒸着し表面をフッ素樹脂塗装したものを利用している。これは、平瓦の曲面を再現できるようにとの配慮からである。この試作における出力は、瓦専有面積^{注1)}あたり 2.3W である。

この試作 Ver.1 について、寺社建築を手がける設計者や寺社の住職にヒヤリングを行った結果、寺社建築の屋根瓦が作り出す流れ方向(縦方向)の湾曲が表現できていない、瓦1枚1枚の景観を維持できていない、というコメントが得られた。寺社建築の屋根の景観維持に対するコンセプトをより重視した方向に修正を行った。

4. 試作 Ver.2

4.1 試作 Ver.2 概要

ヒヤリング結果を基に、下記に示すコンセプトを追加した。

瓦の流れ方向(縦方向)の湾曲を表現する。

瓦1枚の景観を維持する。

太陽電池モジュールの表面は、ガラスではなく表面の鏡面反射を防ぐために樹脂で加工する。

発電効率が高く、豊富な実績があり信頼性がある結晶型の太陽電池セルを使用する。

上記の4つのコンセプトの元、検討を行った結果、瓦をそのまま利用し、瓦1枚に対して太陽電池モジュールを貼り付ける方法とした。その試作品を試作 Ver.2 とし写真-3 に示す。



写真-3 試作 Ver.2 太陽電池モジュール
Trial samples Ver.2

本瓦は、黒色、もしくはいぶし銀色であるためセルは黒色の単結晶型が適しているが、試作 Ver.2 では、写真-3 に示すように多結晶型セルで代用した。結晶型のセルは、板状であるので曲面に対応することが難しい。そこで、最も曲率の小さい平瓦部分に設置することとした。また、平瓦部分の曲率に合わせるために、セルは規格のものを小割し樹脂でラミネートすることで対応した。

なお、平瓦部分に太陽電池モジュールを貼付した場合、朝夕に両側の丸瓦が作り出す影がセルに当たり、発電効率が低下することが懸念される。

4.2 発電性能試験概要

丸瓦の影の影響を加味した発電性能を把握するために試験を行った。試験装置を写真-3 に示す。

装置は、真南向き、傾斜角度 30° の架台に2枚の本瓦を載せ、丸瓦に挟まれた平瓦部分に試作 Ver.2 を取り付けられている。出力を得るための負荷は、2.5V × 0.3A、0.75W の電球を4個並列に接続した(合計 3W)。試作 Ver.2 太陽電池モジュールの電気特性を表-3 に示す。

表-3 試作 Ver.2 太陽電池モジュールの電気特性
Electrical properties of trial sample Ver.2

最大出力 Pmax (W)	2.6	短絡電流 Isc (A)	1.53
最大出力動作電流 Ipm (A)	1.40	開放電圧 Voc (V)	2.39
最大出力動作電圧 Vpm (V)	1.86		

丸瓦の影による発電量の低下を把握するために以下の2つの測定を行う。

9:00 ~ 17:00 の間、1時間毎に試作 Ver.2 太陽電池モジュールに差し込む丸瓦の影を計測する。

注1 重ね合わせ部分を除いた投影面積

7:00～17:00の間、1分毎に日射量、太陽電池モジュールの表面温度、外気温度、出力電流、出力電圧の測定を行い、写真-3の左側(西側)の丸瓦が設置されている場合と設置されていない場合のデータを収集する。

実測は、2002年10月11日(金)2002年10月12日の中間期の晴天時に行った。



写真-4 試作 Ver.2 を用いた試験装置
Test equipment using trial sample Ver.2

4.3 試験結果

10月11日(木)晴天時の9:00～17:00の間、1時間毎に試作 Ver.2 太陽電池モジュールに差す丸瓦の影の計測結果を図-5に示す。

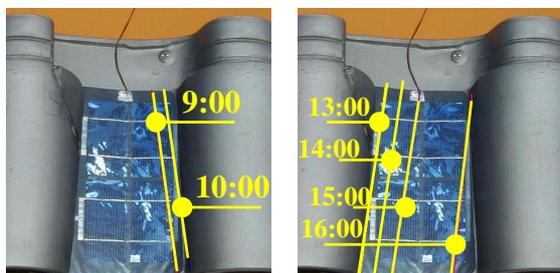


図-5 丸瓦の影(午前/午後)
Shadows on "MARUKAWARA" roof tile
(morning / evening)

この結果から、10時～13時の3時間は、影が太陽電池モジュールにかからない。9時と14時では、太陽電池セルの1/8、16時では、ほとんど影になることがわかる。

10月11日(木)晴天時は、写真-4の左側(西側)に丸瓦を設置した状態で、10月12日(金)晴天時は、写真-4の左側(西側)の丸瓦を取り外した状態で実測を行った。その結果を図-6に示す。その結果を基に1日の発電量と午後の発電量を算出したデータを表-4に示す。

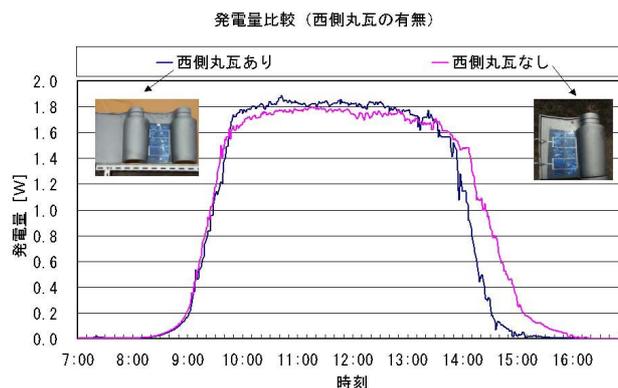


図-6 丸瓦の影による発電量の比較
Comparison of the effect of shadow on the amount of power generation("MARUKAWARA" roof tile)

表-4 丸瓦の影による発電量の比較
Comparison of the effect of shadow on the amount of power generation("MARUKAWARA" roof tile)

	本瓦 設置状況	7時～17時 発電量 (Wh)	12時～17時 発電量 (Wh)	7時～17時 日射量 (Wh/m ²)
10/11	西側丸瓦有	8.56	3.80	6138.8
10/12	西側丸瓦無	9.06	4.38	6106.7

図-6より、14:00以降、西側にある丸瓦の影響により発電量の差が現れ始めていることがわかる。この発電量の差は、表-4の12時から17時までの発電量の値の差であり0.58Whであることがわかる。西側と東側に丸瓦がない状態つまり丸瓦の影の影響を全く受けない1日の発電量は、8.56(Wh)+0.58(Wh)×2=9.72(Wh)と想定できる。よって、丸瓦の影による減少は約10%であることがわかる。表-1から多結晶の太陽電池の発電効率は、約13%である。丸瓦の影による減少分約10%は、発電効率から得た発電量に対する減少分なので丸瓦の影を考慮した発電効率は、約12%程度になることが確認できた。

5 実大模型実験

5.1 装置概要

試作 Ver.2の試験結果から、本瓦の丸瓦の影による影響は1割程度であることがわかった。そこで、配線方法も含めた検討を行うため実大のシステム模型を製作した。製作したシステム模型を写真-5に示す。システム模型は、東京、真南、傾斜角度30°で設置している。対象とする瓦は、本瓦と和瓦でそれぞれ横3枚、縦7枚の合計21枚設置している。実大実験では、当初のコンセプト

通り単結晶型の太陽電池モジュールを使用している。

太陽電池モジュールの1枚当たりのセル面積は、0.02 m²であり、本瓦、和瓦の1枚当たり瓦専有面積は、それぞれ0.0663 m²、0.0623 m²である。



写真-5 製作した実大のシステム模型
Full-scale model

瓦1枚の太陽電池モジュールの電気特性を表-5に示す。電気特性は、放射照度 1000W/m²、AM1.5、モジュール温度 25 の条件下の値で、本実験で使用する太陽電池モジュール 35 枚分の平均値である。

表-5 太陽電池モジュールの電気特性
Electrical properties of Photovoltaic modules

平均最大出力 P _{max} (W)	3.1	仕様最大出力 P _{max} (W)	2.7
最大出力動作電流 I _{pm} (A)	1.65	短絡電流 I _{sc} (A)	1.84
最大出力動作電圧 V _{pm} (V)	1.9	開放電圧 V _{oc} (V)	2.5

写真-5 に示す左側の本瓦は、2列分(太陽電池モジュール 14 枚)の発電性能の確認を行い、右側の和瓦は、3列分(太陽電池モジュール 21 枚分)の発電性能を確認することとした。接続に関しては、1列の瓦7枚分の太陽電池モジュールを直列接続とし列間は並列接続した。その結果、モジュールの発電電圧は、約 12V になるので出力を得るための負荷には、12V の電球を使用した。

5.2 測定概要

それぞれの瓦に設置した太陽電池モジュールの性能を把握するために実測を行った。測定項目は、気象条件(外気温、外気湿度、南傾斜面日射量)及び太陽電池モジュール関連(発電電流、発電電圧、モジュール表面温度、モジュールがない部分の瓦表面温度)である。写真-6 に日射計の設置状況、写真-7 に表面温度センサー

の設置状況を示す。日射計は、向きと傾斜角度をシステム模型と合わせて取り付けした。また、瓦と太陽電池モジュールの表面温度センサーには、T型熱電対を使用した。



写真-6 日射計の設置状況
Pyranometer attachment



写真-7 温度センサー設置状況
Thermocouple attachment

発電性能を確認するために以下の2つの測定を行う。

9:00 ~ 17:00 の間、1時間毎に太陽電池モジュールに差し込む瓦の影を観測する。

晴天時の7:00 ~ 17:00の間、日射量、太陽電池モジュールと瓦の表面温度、外気温、出力電流、出力電圧を全て分単位での測定を実施する。

5.3 初期発電性能試験結果

5月22日(木)晴天時の9:00 ~ 17:00の間、1時間毎に太陽電池モジュールに差す瓦の影の計測結果を図-7と図-8に示す。

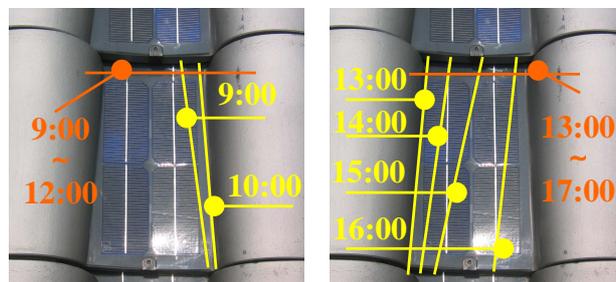


図-7 本瓦の影(午前/午後)
Shadows on "HONKAWARA" roof tiles
(morning / evening)

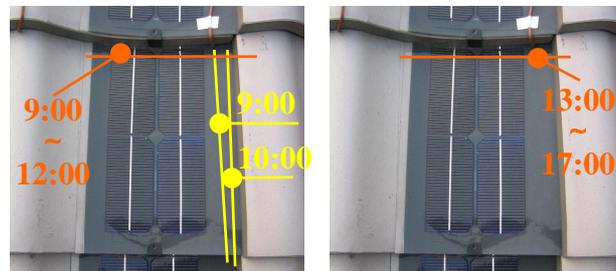


図-8 和瓦の影(午前/午後)
Shadows on "WAKAWARA" roof tiles
(morning / evening)

以上の結果から、本瓦、和瓦ともに上段の重ね合わせの瓦の影が常に同じ位置に差していることがわかる。本瓦は、両側の丸瓦の影が、10時 ~ 13時の3時間、太

太陽電池セルにかからない。9時と14時では、太陽電池セルの1/8、16時では、殆ど影になることがわかる。和瓦は、両側の畝状部分の影が太陽電池セルにはかからないことがわかる。5月22日(木)の発電量と日射量の変化を図-9に示す。天候は、晴れのち曇りであった。

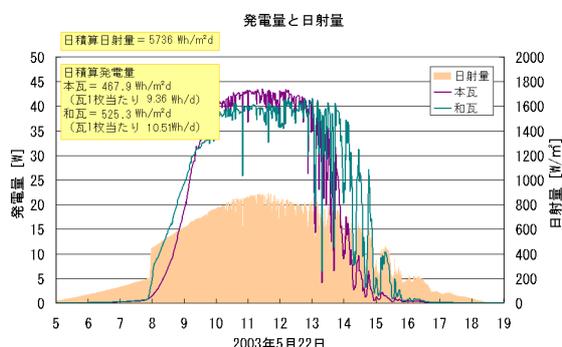


図-9 1日の発電量と日射量の変化
Daily change of power generation and insolation

図-9のグラフから日射量は、午前中はきれいな曲線を描いて上昇しているが、13時以降は雲の影響を受けばらついている。また、11:00~12:00の間でピークとなりその値は約900W/m²、1日の積算日射量は、5736Wh/m²・dayである。なお、8時に急激に上昇している理由は、東側にある住宅の影によるものである。本瓦と和瓦に設置した太陽電池モジュールの発電量は、11:00~13:00の間でピークとなり、その値は、それぞれ約42Wであることがわかる。この実測結果を基に装置全体のセル面積(0.42m²)を基準として1日の積算発電量を算出すると、本瓦部分の発電量は467.9Wh/m²・dayとなり、和瓦部分の発電量は525.3Wh/m²・dayとなる。また、瓦1枚当たりの1日の積算発電量は、本瓦では9.36Wh/dayとなり、和瓦では10.51Wh/dayとなる。本瓦の発電量は、丸瓦の影の影響を受け和瓦よりも約10%低下している。

周囲の影の影響を受けない11:00~13:00のセル温度と発電効率の関係を図-10に示す。

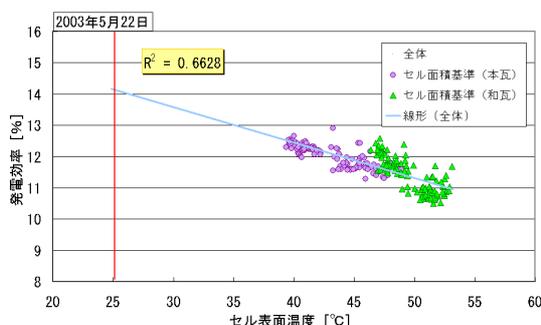


図-10 セル表面温度に対する発電効率
Effect of surface temperature on power generation efficiency of Photovoltaic cell

図-10のグラフから発電効率は、10%~13%の間に納まっており、その平均は11.7%である。また、表-1で示したように高温になると発電効率が低下するという結晶型セルの特徴があらわれている。

仕様上の発電効率は13.5%である。それは、放射照度1000W/m²、セル温度25の条件下での値である。今回の実測データを基に25での発電効率を想定するために、同図に線形近似を示す。その結果、発電効率は、約14%であることがわかる。よって仕様通りの発電効率が得られていることが確認できた。

6. まとめ

寺社建築の屋根材である本瓦の景観を維持し、発電効率の低下を抑えた太陽電池モジュールの開発結果は以下の通りとなる。

寺社建築の屋根材である本瓦の景観を維持するために瓦1枚単位の形状、単結晶型セル、表面は樹脂で加工した太陽電池モジュールを開発した。

本瓦では、両側の丸瓦の影により発電量が低下するが、その値は10%程度であることがわかった。

開発した太陽電池モジュールは、実大模型実験を行い、発電量や発電効率など実用化に向けたデータを蓄積した。

今後は、年間を通じた発電量を収集し発電性能の把握と暴露試験による耐久性の確認を行うとともに、2001年度で約75万円/kWといわれている市販の太陽電池モジュールの平均設置費用に近づけるためにコストダウンを検討する予定である。

本研究は、2000年から始まった曹洞宗泉龍寺 住職菅原昭英氏、朱雀都市建築研究所 代表取締役原田徳明氏との共同研究による成果の一部である。また、関係各位の方々にご指導いただいたことに関し深く感謝いたします。

参考文献

- 1)PV 建築デザインガイド[世界の太陽光発電建築事例集] 新エネルギー・産業技術総合開発機構/編
- 2)朝日新聞 2003年5月11日 朝刊
- 3)2002年度版 デザイナーのための内外装材チェックリスト 建築文化 12月臨時増刊