

# 垂直設置型の太陽光発電における入射角依存性を考慮した推定方法の紹介と今後の建材一体型の課題

## An Estimation Method Considering Incident Angle Dependency in Vertically Mounted Photovoltaic Systems and Future Challenges of Building-Integrated Photovoltaics

大関 崇\*

### 1. はじめに

本稿では、NEDO プロジェクト（PVTEC 再委託）で実施した、壁面設置太陽光発電システムにおける入射角依存性を考慮した推定方法の検討を中心に解説し、最後にこれまでの建材一体型の研究開発と今後の展開について述べる。

### 2. 「壁面設置太陽光発電システム 発電電力量推定方法に関するガイドライン～入射角依存性を考慮した推定方法～」について

壁面設置太陽光発電システムの場合、垂直設置となるため、一般的な地上設置（傾斜角度 10 ～ 40 度程度）と比較すると、日射量強い時間帯において、大きな入射角で入射する頻度が多くなる。太陽電池モジュールは一般的には入射角が大きくなるほど標準試験状態の入射角度 0 度と比較して、発電特性が

低下する。また、建物の壁面設置となり、周囲環境に建物が存在することが想定されるため、日影の影響を考慮することも重要となる。表 1 に壁面設置を地上設置と比較した場合の代表的な発電特性をまとめた。壁面設置の発電電力量推定においては、地上設置の時と比較して、入射角度、日影の影響を十分に考慮した推定方法が必要となる。日影に関しては、地上設置においても考慮している例もあるが、入射角度による影響（入射角依存性）について検討している発電電力量推定は少ない。

そこで、壁面設置太陽光発電システム市場拡大のための共通基盤技術の開発とガイドライン策定において、入射角依存性を中心とした発電電力量推定方法に関する注意点をまとめたガイドラインの策定を行った。

#### 2.1 既存の発電電力量推定ツール

現在、PV システムの発電電力量を推定するツール、ソフトウェアが市販や研究所から公開されている。それぞれ日射量データベースへの対応、各種損失過程のモデルや設定の自由度などが異なる。壁面 PV における周辺建物の影響による日陰の分析など必要な CAD や BIM (Building Information Modeling) との連携ができるものなどもある。代表的なツールとしては、PVSYST, System Advisor model (SAM), Solar Pro, PVlib 等がある。これらソフトの特性は、IEA PVPS TASK 15 のレポート「BIPV Design and Performance Modelling : Tools and Method」にまとめられているため、参考にするといよい。このうち壁面 PV に必要な入射角特性を考慮可能なツールとしては PVSYST, SAM, PVlib があり、モデルは後述する ASHRAE モデル, Martin and Ruiz IAM モデル, Sandia モデル等が利用されている。

表 1 壁面設置を地上設置と比較した場合の代表的な発電特性

|                  |                                                                                        |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 日射に関連する特性        | 都市部への設置が想定されるため、周辺の建物などの影響による日陰の影響が多くなる。また、天空率が相対的に小さくなるため、散乱日射量の減少が大きくなる。             |
| 太陽電池の物理的特性       | 垂直面のため日射量の大きい時間帯における入射角度の大きい条件の頻度が高くなり、入射角特性の影響が大きくなる。同様に低照度の頻度も高くなるため、低照度特性の影響が大きくなる。 |
| アレイ構成における特性      | 日射に関する特性と関連して、部分的に日陰の発生があるため、アレイ内のミスマッチ損失が発生する可能性がある。                                  |
| パワーコンディショナにおける特性 | アレイ構成における特性と関連して、アレイ内のミスマッチによる MPPT 制御が困難になる可能性がある。                                    |

\* 産業技術総合研究所 総括研究主幹

## 2.2 入射角依存性を加味した発電電力推定方法

入射角特性の異なる防眩、非防眩モジュールを利用して、屋外での実発電量とシミュレーションによる推定発電量の比較を行うことで、発電電力推定方法を検討した。

### (1) 屋外実証設備

実証データの主な諸元は下記の通りである(図1)。

- ・ 設置場所：山梨県北杜市
- ・ 太陽電池モジュール：9セルのうち1セルの短絡電流を測定
- ・ 防眩有無の比較
- ・ 日射量：垂直面日射、直達日射、水平面日射、水平面散乱日射、アルベドを測定

### (2) 入射角特性の屋内測定

屋内測定結果を反映した推定モデルを検討するため、屋内での入射角特性を測定した。屋内測定では、ソーラシミュレータを利用して直達成分の入射角特性の測定を行った。回転軸は、測定する太陽電池モジュールの中心を軸とした。また、測定時の直列抵抗などの影響により特性が変わる可能性があるため、4端子測定とした(図2)。入射角特性は、基本的には短絡電流により測定した。測定結果については、入射角が大きくなるにつれて太陽電池の受光面に到達する日射強度が減少するため、 $\cos$  特性により測定した短絡電流を補正する必要がある。入射角0度の短絡電流の値を基準として、入射角度の  $\cos$

特性の値で割り戻した値との比率が入射角特性となる。図3に  $\cos$  特性の割り戻しおよび基準値との比を計算した。また、測定条件として、入射角度の分解能を考慮する必要がある。入射角が小さいところでは、相対的に入射角特性の影響が小さいことが一般的であるため、10度ごとの測定を行い、入射角特性が低下しはじめる60度より大きい角度では、5度以下程度の分解能で測定を行った。

### (3) 入射角依存性の損失モデル

入射角特性を加味した推定モデルについては、入射角特性は日射量の直達成分と散乱成分、反射成分を考慮したモデルを検討した。直達成分については、太陽電池面日射量の入射角とその低減特性を表現するモデルである。入射角0度(太陽電池に垂直入射する場合、標準試験状態と同じ条件)を1.0として、そこからの低減する特性をモデル化している。本事業では、ASHRAE IAMモデルを採用した。ASHRAE IAMモデルは最も単純なモデルであり、SoukaとSafat(1966)によって開発され、後に米国のASHRAEによって採用された。計算式を式(1)に示す。このモデルはパラメータが $b_0$ の1つで済



図1 屋外実証設備の外観

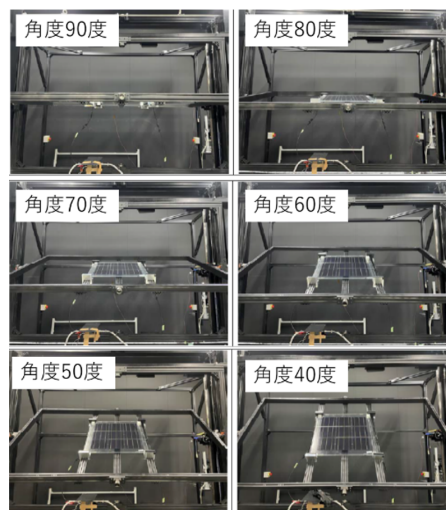


図2 屋内における入射角特性測定のイメージ

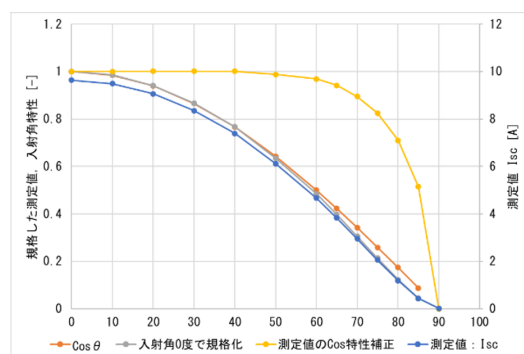


図3  $\cos$  特性の計算結果のイメージ

むという利点があるが、90度において数値がゼロにならないため入射角の高い領域において表現できない条件が発生する問題がある。ここでは、5度刻みで計算し、90度でゼロとなるように設定した。

$$\text{入射角特性} = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

$\theta$  : 入射角度,  $b_0$  : パラメータ

散乱 / 反射成分モデルについては、M. J. BRANDEMUEHL らのモデルを採用した。散乱や反射日射は太陽電池面から見た天空分布、反射分布は均一で太陽電池モジュール面に到達することを想定した場合、様々な入射角からの日射が入射してくる。基本的な考え方としては、この様々な入射角度を考慮し、直達成分の反射特性を利用して、散乱日射および反射日射量を低減するモデルとなっている。具体的には、想定される入射角ごとの入射角特性を加重平均（積分）して計算する。このモデルでは、太陽電池アレイの傾斜角に依存して、太陽電池アレイ面から見える天空率や反射する地表面の面積

や入射角度が異なるため、計算式は傾斜角度をパラメータとしたモデルとなっている。モデルとしては、散乱日射量および反射日射量について、傾斜角ごとに加重平均（積分）した値が、直達成分の入射角特性に対応する、代表の入射角度（ $\theta_d$  および  $\theta_r$ ）を求めるモデルとなっている。

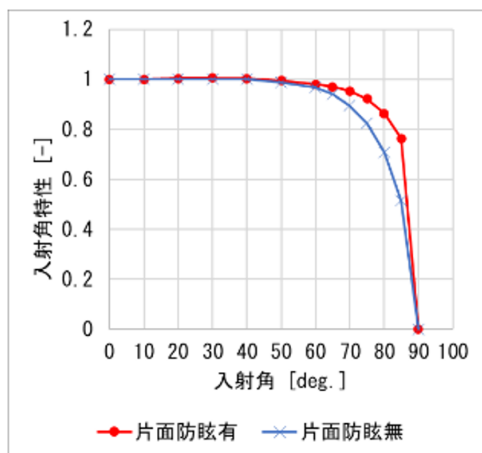
#### (4) 推定モデルの検証結果

推定モデルの妥当性を検討するため実測との比較を行った。実測は、2021/10～2024/6（2022/10～2023/5は屋内測定のため未計測）のデータを利用した。推定モデルの計算には、傾斜面全天日射量、水平面全天日射量、法線面直達日射量を実測しているため、法線面直達日射量から傾斜面直達日射量を計算し、水平面全天日射量および水平面直達日射量の差分である水平面散乱日射量を Perez モデルにより傾斜面散乱日射量を計算した。なお、直達成分モデルは、離散値の屋内測定データをモデルに導入する際には連続値として利用するため、ASHRAE IAM モデルによる近似を行った。図4に防眩有無の太陽電池モジュールの特性を示す。

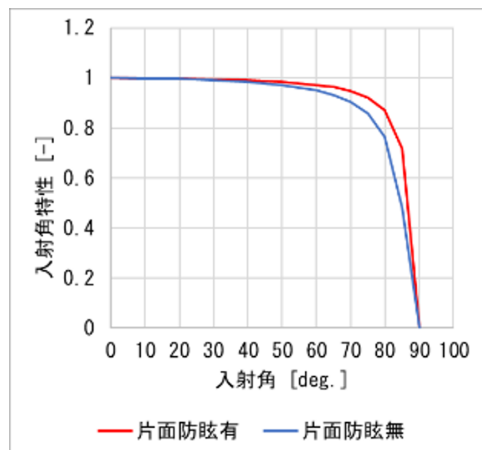
推定モデルの有効性を確認するため、防眩有りを実測とし、以下の条件により推定を行った。

- ①入射角特性を考慮しない；日射量に定格容量を乗じた値
- ②入射角特性を考慮（直達のみ）。防眩無し（屋内測定値）を利用
- ③入射角特性を考慮（直達、散乱、反射）。防眩無し（屋内測定値）を利用
- ④入射角特性を考慮（直達のみ）。防眩有りの特性（屋内測定値）を利用
- ⑤入射角特性を考慮（直達、散乱、反射）。防眩有り（屋内測定値）の特性を利用

図5は、2021/10～2024/6まで実測値を利用した推定モデルの比較結果を示す。縦軸は月ごとの積算値の推定値 / 実測値であり、1.0は推定値が実測値と一致していることを示す。①の入射角特性を考慮しない場合、損失を考慮していないため、推定値が実測値より大きい値になっている。②③は屋内測定した防眩無しの入射角特性を利用した場合の推定結果を示している。防眩無し特性のため、防眩有りよりも損失が多くなることが想定される。③の全成分を考慮した場合推定値が実測値よりも小さくなった。④⑤は屋内測定した防眩有りの入射角特性を利用した結果を示している。全成分を考慮することにより推定値が実測値に近い特性を表している。また推定結果より、直達成分を考慮することで、月ごと



(a) 屋内実測結果



(b) 近似結果

図4 屋内の入射角特性測定結果

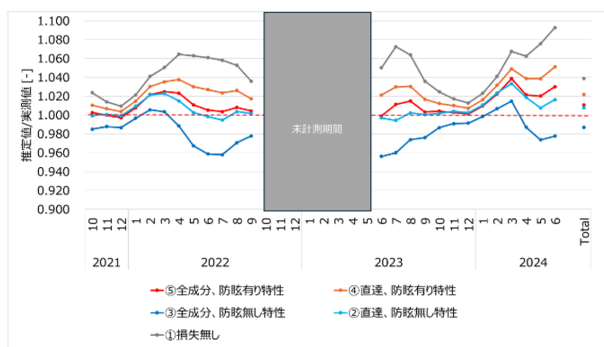


図5 推定モデルにより推定した結果（2021/10～2024/6：月間値）

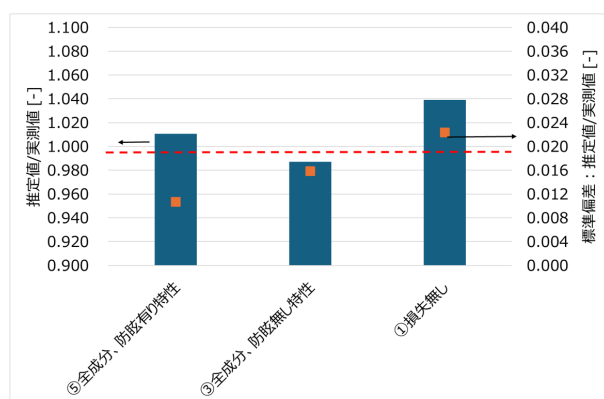


図6 推定モデルにより片面防眩有りを推定した結果（全期間）

に約1～4%（年間2%）の差，散乱および反射成分の考慮により月ごとに約1～2%（年間1%）の差となり，また防眩無し／有りによる屋内の入射角特性の測定結果の利用有無では，月ごとに約1～5%（年間2.4%）の発電電力量の推定の差となった。

図6には全期間のデータを利用した結果を示す。縦軸は期間積算値の推定値／実測値，左軸は月ごとの推定値／実測値の標準偏差を示している。防眩有り特性を利用し，全成分を考慮することで月ごとのばらつきが少ないことを示し，季節性もより精度よく推定できている。

### 3. 建材一体型のこれまでと今後の展開

国内における建材一体型の研究開発は，サンシャイン計画の1985～1992年度の市場化開発フェーズにおいて，個人住宅向けとしてガラス製スレート瓦を用いた検討，業務用建物向けとしてGRCと太陽電池をアルミ枠で一体化したモジュール開発，設置工法などの検討が進められた。1993年のニューサンシャイン計画では，2000年目標に建材一体型としてシステムコストを260円/kW，発電コスト25円/kWhなどの目標が定められている。通常のシス

テムより安価になるコスト目標がおかれていることが特徴である。1993～1996年度において，個人住宅，ビル等への用途に対応するために，3タイプ6方式（着脱式平板パネル，屋根パネル，断熱パネル，ガラスカーテンウォール，金属カーテンウォール方式，建材対応フレキシブルモジュール）の開発が行われ，平行して実用化解析に関する調査研究が行われた。ここでは数kWシステムの実証において発電特性などのデータ収集も行われた。1996～2000年度には，新建材一体型として，建物との融合に対する機能・仕様・建築材料対応の新しいモジュール材料を目的とした，高耐火性平板モジュール，高耐久性屋根モジュール，高強度・軽量，大面積モジュール，新複層構造モジュール，曲面構造型フレキシブルモジュールの開発が開始された。このころから建築家，デザイナーの要望ニーズ，メンテナンス性，付加価値的機能などが議論されている。また建築基準法などの関連法規との関係，発電性能，建材性能の双方からの評価方法の標準化についても調査された。さらに，研究開発プロジェクトと並行して，フィールドテスト事業が実施され，1998～2002年度からの産業等用太陽光発電フィールドテスト事業（新形態利用型の中に建材一体型），その後の2003～2008年度の太陽光発電新技術等フィールドテスト事業において，実システム201件，4976kWの導入が行われた（フィールドテストのカテゴリによる集計のため，建材一体型以外も一部含まれる）。住宅用においては，1997年からキヤノン，2003年ごろより積水ハウスの屋根瓦と一体型の販売などが行われている。

ニューサンシャイン以降は，2001～2005年度の研究開発プロジェクトにおいて，短期的な普及加速型技術開発，中長期の先進太陽電池技術開発，超長期の革新次世代のプロジェクト，システムの共通基盤技術研究開発，新電力ネットワークにおいては，関連するフレキシブルなどの太陽電池デバイス開発は進められたが，建材一体型の切り口ではなくなった。2006～2009年度は，同様に短期課題として実用化加速技術，実用化促進技術，中期的課題とした未来技術研究開発，共通基盤技術開発が行われた。2008～2015年度までは超長期課題として革新的太陽光発電技術研究，2010～2015年度には共通基盤と未来技術を統合した次世代高性能技術開発プロジェクト，2012～2015年度は有機系太陽電池実用化先導技術開発プロジェクトが行われた。建材一体型に特化した取組はこれらの中にはなかったが，有機系太陽電池の利用としてウインドウフィルムタイ

プ（三菱化学）、室内インテリア用途（日立造船）、ビニルハウスの天井部分（太陽誘電、ビフレステック）、壁面用ユニット（三菱化学、大成建設）などが実施され、2013～2015年度に行われた太陽光発電多様化実証においては、低反射環境配慮型壁面太陽光発電システムの開発（カネカ）、強度の弱い畜舎向け軽量発電システム開発（株式会社オルテナジー／旭硝子株式会社）、太陽電池屋根設置型ビニルハウス植物工場化プロジェクト（ユニバーサリー電工株式会社）、コミュニティ型ベランダソーラー（みんな電力株式会社）など関連する実証研究が実施された。このように一部研究開発プロジェクトで関連の技術開発は行われつつ、建材一体型は前述のフィールドテスト事業での実証がメインとなっていた。しかしながら、フィールドテスト事業後も導入拡大が進まなかった理由の一つとしては、標準システムよりも高コストであることがあげられる。

その後研究開発プロジェクトは、次世代高性能プロジェクトのテーマの発展として、立地制約や付加価値の向上という観点も目的に含み2014～2018年度に太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクトおよび太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト、2015～2019年度に高性能・高信頼性 太陽光発電の発電コスト低減技術開発が実施された。このフェーズでは、システム効率向上・維持管理技術開発において ZEB 実装に向けた太陽光発電システム技術開発があり、新建材一体型モジュール+高い耐久化による BOS コストの削減（カネカ）、内部反射型効率向上・企画化壁面設置太陽光発電システムの開発（カネカ）、壁面設置太陽光発電システム適用高出力化技術・建築性能評価技術の開発（カネカ）が実施され、設置コスト低減や建築機能の評価方法、高性能・高信頼性においては、ZEB 適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発が実施された。また、動向調査:BIPV（建材一体型太陽光発電）に関する検討（PVTEC）では BIPV の施策、技術的課題やそれ以外の課題や導入に向けたポテンシャルが検討されている。この中では、コストに関係なく採用されるような魅力の必要性、外壁にタイルではなく高価な石を選択するように色／デザイン／ひさしとの一体化などのデザイン上の魅力を追求なども課題としてあげられた。

2019 年度には、既設建築物への ZEB 化に向けた太陽電池設置の可能性に関する調査（PVTEC）において建材一体型に関する以下のような課題が改めて整理された。①建築物・街並みとの一体感のある

PV の開発（色・透過性・サイズの自由度・防眩加工などテクスチャ）②設置・交換・メンテナンスの容易な PV モジュールと施工方法③多様な設置場所に適合した PV モジュールの開発④所与の色・デザイン・垂直・部分影環境で最大の発電量を得られる PV システムの開発⑤建築物として必要な安全性と信頼性に配慮した PV モジュール・システムの開発⑥単純な価格競争に陥らない高付加価値製品としての BIPV システムの開発⑦様々な設置環境で発電量を簡便にかつ必要十分な精度で推定するシミュレーションソフト⑧多様な業界に技術的要件をわかりやすく、正しく伝えるための標準化を視野に入れたガイドライン作成。

その後 2020～2024 年度には太陽光発電主力電源化推進技術開発が開始され、このフェーズではデバイス開発の中でも設置形態を想定した開発が実施され、新市場創出技術開発のフィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発として 11 件のグループ、壁面設置太陽光発電システム技術開発として 13 件のグループの研究開発が実施されるなど、建材一体型に関連する多くの研究が行われた（なお、前半の発電電力量推定に関して、この中の「壁面設置太陽光発電システム市場拡大のための共通基盤技術の開発とガイドライン策定」の一環で実施した）。これらの目標として、軽量型は、架台を含めたモジュール重量  $3\text{kg}/\text{m}^2$  以下、大面積フィルムモジュールで変換効率 23% 以上、製造コスト 15 円/W 以下の見通し、屋外曝露 25 年時点での初期変換効率に対する低下率 10% 以下とされた。壁面設置については、非開口部向けとして東南西面への設置で発電コスト 14 円/kW 以下を達成する要素技術の確認、建築物としての寿命 40 年以上を達成する要素技術の開発、面内の色調が均一なモジュールで変換効率 20% 以上の達成、開口部向けとして発電コスト 16 円/kWh 以下を達成する要素技術の開発、半透明モジュールで可視光透過率 20% 以上、変換効率 13% 以上の性能を達成する要素技術の開発、窓の代替として用いる際の性能について 20 年相当の寿命を確認することを目標として進められた。これら研究開発は 2024 年度末に終了し、現在、新しい研究開発プロジェクトが公募中である。新しいプロジェクトの太陽光発電導入拡大等技術開発事業の一つに「設置場所に応じた太陽光発電システム技術開発」のテーマが設定され、適地制約の解消及び多様化するニーズへの対応を目的として、太陽電池モジュール開発（低コスト化・高効率化・軽量化・高意匠化・

難燃化・高耐久化等)、太陽光発電システムの設置・施工方法の開発、設置・施工後の維持管理方法等の開発が行われる予定である。

国際的には、IEA PVPSにおけるTaaskの活動がある。IEA PVPS TASK 7: Photovoltaic power systems in the built environmentにおいて建材一体型などのトピックが扱われ、1997～2001年までの間にBuilding Integrated Photovoltaic Power Systems Guidelines for Economic Evaluationなど6件のレポートが発行されている。その後、2015年からは、IEA PVPS TASK 15 Enabling Framework for the Development of BIPVが開始し、第3フェーズとして現在まで継続している。この中では、事例集、建築関係の基準、各種ツールのサーベイなど18件のレポートが発行されており、アクティブに活動されている。

以上の通り、建材一体型研究開発について簡単にレビューした。システムとしては1990年代からすでに一部実システムとして導入、実用化されてきたが、研究開発は継続的に実施されてきている。方向性としては大きく二つに分かれているものと考えている。一つは、当初の建材一体型に期待された建材とのコストシェアなども含めたコストダウンがあり、住宅用のハウスメーカーの屋根へのデフォルト化などによるコストダウンの志向であり、導入が進んでいるといえる。もう一つは、壁面や窓など特殊な設置は量産化するまでに至ってないことから、コストが相対的に高いことが課題となっていることによる、デザイン性や建築性能への付加価値への志向である。コスト低減を目指す標準化と、建材に適した多様化の二つの方向性は相反する面があるため、どちらかに寄せた開発が進められてきたが、今後はその両立に向けたイノベーションがさらに必要であると考えている。例えば、セルの標準化と多様化モジュールへ対応する標準化セル、多様化設置場所に対応する標準施工とモジュール技術などである。また、システム面でいえば、発電電力量推定技術は、各種日影推定ツールやBIMとの連携（デジタルモデルなど）も進んでいるが、BIMと詳細発電ツールのスムーズな連携やPlutouなどに代表されるDSM/3Dなどの建物関連のオープンデータ化などの基盤整備は必要である。また、ベースとなる傾斜面日射量推定においても壁面における天球率を加味した散乱日射の推定精度向上も課題といえる。さらに安全性については、住宅用において消費者事故調査で取り上げられたように、建材が自ら発火源となることは現在の建築関係の試験では考慮されていない

ため、飛び火試験や材料そのものの延焼性試験だけでは性能確認できず、屋根材への延焼が発生し住宅火災が発生した。現在は太陽電池裏面には不燃材等が利用されるようになったが、今後住宅用以外でも同様な火災安全性については検討していく必要がある。また、感電リスクとして、建材一体型と通常の太陽光発電の異なる点としては、取扱者以外が接触可能な場所に設置される可能性が相対的に高いことである。二重絶縁の太陽電池モジュールには健全時に触れることは安全上問題無いが、破損した場合など電路に触れると感電のリスクがある。設計上として破損した場合まで考慮する必要があるかは論点の一つであるが、太陽光発電は光が当たっている限り発電を止められない。また、ガラスが割れただけでは、それを検知できるかどうかは、接地や検知方法との関係で確実ではないといえる。海外でのプラグイン型のバルコニーPVが普及する中、IEC等でも一部話が出ている点でもある。他方、これまで筆者が認識している範囲では関連する感電事故は発生していない（保守点検時の交流部、施工時の直流部では事例あり）。そのような全体の背景において、建材一体型だけではないが、今後整理が必要な事項である。

#### 4. まとめ

垂直設置型の太陽光発電における入射角依存性を考慮した推定方法の紹介と今後の建材一体型の課題を述べた。紙面のみでは伝えきれないところもあるが、今後のみなさまの研究開発、普及拡大の一助となれば幸いである。

#### 謝辞

本解説の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）の結果である。関係者各位に感謝する。

#### 著者略歴



大関 崇（オオゼキ タカシ）  
東京農工大学電気電子工学専攻博士後期課程修了。博士（工学）。2005年国立研究開発法人産業技術総合研究所入所。現在、福島再生可能エネルギー研究所再生可能エネルギー研究センター太陽光システムチーム研究チーム長。太陽光発電システムの研究開発に従事。