特集

太陽光発電システムの耐風安全性向上にむけての取り組み

太陽光発電システムの強風被害の実情と耐風設計マニュアル作成の背景

Factual Situation of Strong Wind Damages on Photovoltaic Systems and Background on Creating the Manual of Wind Resistant

高森浩治*

Koji TAKAMORI

1. はじめに

太陽光発電システム (PV システム) の増加に伴い、強風による被害も増加傾向にあり、PV システムの構造安全行政を管轄する経済産業省も強い懸念を示している。PV システムの被害の多くは電気事業法で要求される設計荷重以下の事象で発生しており、それらは太陽電池モジュール (モジュール) の支持物 (支持架台や基礎) の耐力不足であったことは明らかである。また、耐力不足の要因としては、支持物の構造設計の不備、施工不良、保守点検の緩怠などが考えられるが、被害調査の結果より誤った構造設計、あるいは設計されていないものが相当数存在することが分かってきている。

他方、PV システムを構造設計するための技術資料は、建築物のそれと比べて圧倒的に少ない。建築物の場合には、建築基準法令の他に日本建築学会をはじめとする各種学会が発行する規準や指針、業界団体が発行する設計標準など、数多くの技術資料が整備されているが、PV システムの場合には、電技機事業法関連法令と、そこから参照されている JIS C 8955:2004「太陽電池アレイ用支持物設計標準」程度である。なお、同 JIS に示されている内容としては、許容応力度設計のための設計荷重の算出方法が大半を占め、構造設計を行うための具体的な方法についてはほとんど示されていない。さらに、近年の研究成果によると同 JIS に示されている設計風荷重用の風力係数が過少であることが指摘されていた。

このような背景をもとに日本風工学会の太陽光発電システム風荷重評価研究会が発足し、「太陽光発電システム耐風設計マニュアル」の作成が進められた。ここでは、まず PV システムの近年の被害事例について触れ、次に PV システムの構造安全に関する法令等について解説し、最後に同設計マニュアルの内容について概説する。

2. PV システムの被害

新エネルギー総合開発機構 (略称: NEDO) が発足した 1980 年以降暫くは PV システムの研究開発期であったことから、その支持物には十分な耐力を有するものが用いられていた。その後 1990 年代に入り、住宅用の PV が普及し始め、再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法 (略称: 再エネ特措法) が施行された 2012 年以降は投資目的の PV システムが爆発的に増加した。これに伴い、太陽光発電事業はより高い採算性が求められるようになり、モジュールだけでなく支持物に対してもより厳しいコストダウンが求められるようになった。PV システムは、建築物の確認検査制度のような第三者によるチェック体制が明確に整備されていないことから、耐力的に問題のある PV システムが相当数導入されていると推測され、それらの被害も増加の一途を辿っている。本章では、近年の PV システムの被害概要とその要因についての考察を示す。

* 奥地建産株式会社 耐風プロジェクト ジェネラルマネージャー
General Manager, Wind Engineering Dpt., Okuji Kensan Co., Ltd

2. 1 地上設置型 PV システムの強風被害

(1) 群馬県での突風による被害

2015 年 6 月に群馬県伊勢崎市に発生したダウンバーストと推測される突風によって、地上設置型 PV が倒壊・飛散する被害が発生した（写真 1）。この PV システムの架台は仮設足場等に用いられる単管で構成されており、架台を支持する杭にも単管が使用されていた。現地調査によれば、部材の接合には単管専用のクランプが使用されていたが、摩擦による接合であったため、クランプの回転やズレが発生し、多くのモジュールが外れて飛散した。また、杭の貫入深さが浅いため十分な支持力が得られず、杭が引き抜けた跡も確認されている（写真 2）。なお、被害発生場所に隣接する農業用ハウスが無被害であったことから、当 PV システムは設計風速以下の強風で被害を受けたと推測されている。

写真 1 伊勢崎市での突風による被害

写真 2 単管杭が引き抜けて架台全体が飛散した様子

地上設置型 PV システムでは、杭の支持力不足によって引き抜かれる被害は比較的多い。また、仮設足場用の単管を用いた架台は簡単に構築できるため構造設計を行っていないケースが多く、脆弱な構造となっているものが多い。

(2) 鹿児島県での台風による被害

2016 年 9 月の台風 16 号による強風によって、鹿児島県南さつま市の地上設置型の PV システムが被害を受けた（写真 3）。このシステムはアルミニウム製の架台が使用されており、写真 4 のようにモジュールを受ける斜材が折損する破壊がみられた。押出成形されるアルミ部材は、比較的自由な断面にすることができるため、大きい断面の中空部材とすることも可能であるが、部材の肉厚が薄い場合には脆性的に折損することがある。また、押出成形のアルミ部材の接合部にはスロットを用いる場合が多いが、写真 5 のようにスロットナットが抜け出したり、部材軸方向に荷重が作用する場合には大きくズレたりすることがある。

被害発生場所から南東約 5 km に位置する枕崎気象観測所では、最大風速 30.1m/s、最大瞬間風速 47.3m/s が記録されていたが、現地では設計風速以下であったと推定される。

写真 3 鹿児島県での台風による被害

写真 4 アルミ部材の折損

写真 5 スロット接合部での破壊

(3) 岡山県での台風による被害

10月22日の午後9時ごろ中国・近畿地方に最接近した台風21号の強風によって、岡山県奈義町のPVシステムが飛散する被害が発生した(写真6)。このシステムの架台は軽量鉄骨とFRP部材の混合構造であり、基礎(杭)には鋼製スクリュー杭が使用されていた。被害発生的主要原因は、杭の抜けおよび杭頭金具(杭と支柱を繋ぐ金物)の破損であった(写真7)。PVシステムの杭には、モジュールや架台に作用する風荷重が集約されて作用するので、杭の支持力や杭頭金具の強度には十分な安全率を確保する必要がある。それらが不足すると架台の基部から飛散する大きな被害に発展する。

被害発生場所から東約3kmに位置するアメダス奈義観測所では最大風速31.2m/s(北北東)、最大瞬間風速46.7m/s(北北東)が記録されており、被害発生場所においても太陽光発電システムの風荷重が大きくなる北寄りの強風が吹いていたと推測される。また、現地での風速が設計風速を超えていた蓋然性が高いが、設計風速に対して許容応力度設計を確実に行うことによって、被害を最小限にとどめられていた可能性がある。

写真6 岡山県での台風による被害

写真7 スクリュー杭の抜けと杭頭金具の破損

2. 2 建物上設置型PVシステムの強風被害

(1) 関東某所での強風被害

2013年10月、関東某所で住宅の屋上に設置されたPV

システムが強風によって飛散し、電柱に衝突したのち県道に落下する事故が発生した(写真8)。その際、県道を走行中の自動車に衝突し破損させている。飛散したPVシステムは、ほぼそのままの形状で落下していることから、建物と架台との接合部の強度不足が被害要因であったと推定される。建物上に設置する場合には、屋根の防水性能を維持しながら架台と屋根の構造体とを接合する必要があるため、既存建築物にPVシステムを設置する場合には、必要な強度確保が難しいことが多い。

写真8 関東某所での強風による被害

(提供: PVシステム所有者)

(2) 福岡県での台風による被害

2015年8月下旬に九州を襲った台風15号は、複数のPVアレイの倒壊・飛散事故をもたらした。写真9は福岡県柳川市の工場の屋根に設置されていたPVシステムが台風による強風で飛散し、近隣の住宅に架台ごと衝突した事故である。幸いこの事故による死傷者はなかった。植松康・東北大学大学院教授(本研究会主査)は、報道の取材に対して「写真などを見る限り、今回の被害では太陽電池パネルの架台に十分な耐力がなかった可能性がある。太陽光発電施設は一度飛ばされれば『空飛ぶ凶器』になりかねない」とコメントしている。これらの事故の発生は、経産省が安全性確保のための規制強化に関する検討を積極的に進めるきっかけとなった。

写真9 福岡県での台風による被害

(提供: 被災住宅の居住者)

2. 3 その他の被害

(1) 積雪による被害

2017 年の冬季の積雪によって、滋賀県高島町の地上設置型 PV システムが崩壊する被害が発生した。写真 10 は、同年 7 月に撮影したものであるが、被害発生から半年間は放置されていた。現地からの最寄りのアメダス今津観測所での当時の日最深積雪は 84cm を記録しており、特定行政庁（滋賀県）が規定するこの地域の設計用垂直積雪量（80 cm～110 cm）に近い積雪があったと推測される。しかし、設計雪荷重に対して確実に許容応力度設計を行なっていれば、終局耐力までの裕度があるので架台は崩壊していなかったと推測される。

なお、被害を受けたシステムの架台は、耐力が低下しているだけでなく、形状が変化することで強風時の風荷重も大きくなることも考えられるので、2 次被害の危険性を考えると、早期の改修あるいは撤去が必要である。

写真 10 滋賀県での積雪による被害

(2) 豪雨による被害

2015 年 9 月に関東に上陸した台風 18 号は、鬼怒川を増水させ、堤防の決壊や越水などの大きな被害をもたらした。写真 11 は越水によって水没・倒壊した PV システムの被害の様子（茨城県常総市）である。この被害では、PV システム建設のために自然堤防を掘削したことは

非が社会的な問題になったが、その一方で、破損した PV システムは感電の恐れもあり、かつ、そのリスクは水没時に高まることから、電気保安行政を管轄する経産省は「水没した太陽電池発電設備による感電防止についてのお願い」という注意喚起文書を発出した。なお、この台風 18 号は宮城県仙台市でも急斜面に設置された PV システムを崩落させ、市道を閉鎖する事故も起こしている。これらの被害リスクを評価するためには、発電所の初期計画段階において地形や地盤に関する入念な事前調査行が重要である。

写真 11 鬼怒川の越水による PV システムの事故
（提供：関係者）

3. PV システムの構造安全に関する主要な法令等

PV システムの構造安全に関連する主要法令としては、経産省管轄の電気事業法（電事法）、国交省管轄の建築基準法（建基法）であるが、農地に設置する営農型 PV システム（ソーラーシェアリングとも呼ばれる）の場合には、農林水産省管轄の農地法も関係する。図 1 は、これらの規制法令をまとめた概念図である。

その他、日本工業規格（JIS）にもモジュールや支持物に関する規格がある。本章では、主要な関係法令と関連 JIS 規格について解説する。

図 1 PV システムの構造関連法令

3. 1 電気事業関連法令

電事法における PV システムのうち電圧が 600V 以下でかつ出力が 50kW 未満のものを「一般電気工作物」、電圧 600V 超あるいは出力 50kW 以上のものを「事業用電気工作物」と位置付けられる。事業用電気工作物は、電事法第 39 条第 1 項によって技術基準に適合させる義務がある。一方、一般電気工作物においては、技術基準に適合していない場合には主務大臣が修理、改造、移転、使用制限などを命じることができることとなっている。ここで、前記の技術基準とは、「電気設備に関する技術基準を定める省令」であり、一般に「電気設備の技術基準」（略称：電技）と呼ばれている。電技第 4 条では「電気設備は、感電、火災その他人体に危害を及ぼし、又は物件に損傷を与えるおそれがないように施設しなければならない」とし、電気設備の災害防止を規定している。電技での技術的な内容をより詳細に解説したものが「電気設備の技術基準の解釈」（略称：電技解釈）であり、PV システムの支持物の強度に関しては電技解釈第 46 条第 2 項に規定されている。そこには、「太陽電池モジュールの支持物は、支持物の高さにかかわらず日本工業規格 JIS C 8955 (2004)『太陽電池アレイ用支持物設計標準』に規定される強度を有するものであること。また、太陽電池発電設備の高さが 4m を超える場合には、更に建築基準法の工作物に適用される同法に基づく構造強度に係る各規定に適合するものであること」が要求されている。なお、この要求は電技解釈第 200 条にて一般電気工作物に該当する PV システムにも準用することが規定されている。上述の JIS C 8955 については、後述する。

3. 2 建築基準関連法令

PV システムの構造安全に関する建基法と電事法の二重規制の緩和措置として、平成 23 年 10 月に国土交通省住宅局建築指導課長通知（略称：国住指）第 4936 号が施行された。これによって、一般的な地上設置型 PV システムは、建基法での建築物（工作物）から除外され、電事法のみ規制を受けることとなった。また、国住指 1152 号（平成 24 年 7 月）によって、既存建築物の屋上に架台を取り付け、その上に太陽電池発電設備を設置する行為は増築に該当しないとし、建築確認は不要とした。ただし、建築物の屋上に当該建築物に電気を供給するために設置される太陽電池発電設備は、当該建築物の新築、既築に関わらず建築設備に該当し、建基法の規制を受けるとしている。

一方、屋根葺き材あるいは壁材と一体化した建材一体

型の太陽電池モジュールは、建築物の外装材としての規制を受けるので、建築基準法施行令第 39 条「屋根ふき材等の緊結」に適用させる必要がある。

3. 3 日本工業規格（JIS）

太陽電池に関連する JIS 規格のうち、構造設計に関する内容で代表的なものとしては、支持物の構造強度に関連する JIS C 8955 およびモジュールの構造強度に関連する JIS C 8990、JIS C 8991 がある。ここでは、これらの JIS 規格について述べる。

(1) JIS C 8955

前述したように電技解釈第 46 条第 2 項においては、PV システムの支持物の構造強度に関して JIS C 8955「太陽電池アレイ用支持物設計標準」（2004 年）を呼び出している。この設計標準の適用範囲は、下端から上端までの高さが 4m 以下のアレイを構築する支持物であり、使用状態が標高 1,000m を超える場合あるいは地上高が 60m を超える場所に設置する場合、若しくは、屋根葺き材・窓材など建材としての機能を併せもつアレイを除外している。想定している荷重は、固定荷重（モジュールおよび支持物の質量の総和）、風圧荷重（モジュールおよび支持物に加わる風圧力の総和）、積雪荷重（モジュール面の垂直積雪荷重）、および地震荷重（支持物に加わる水平地震力）である。これらの荷重の計算方法は概ね建基法およびその関連法令や送電用支持物設計標準などに準拠している。また、構造計算には許容応力度設計法を採用されている。

なお、同 JIS は 2017 年 3 月に大幅改正され、名称も「太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算出方法」と変更された。この改正によって各種設計荷重は適正化が図られ、風荷重や雪荷重は大幅に増加した。風荷重算定用の風力係数については、本設計マニュアルで紹介されている近年の研究成果¹²⁾が盛り込まれている。一方で、材料の選定、許容応力度、部材の接合、防食などの内容は削除された。そのため、電技解釈第 46 条第 2 項の改正についての検討が現在進められている。

(2) JIS C 8990、JIS C 8991

JIS C 8990 および JIS C 8991 はいずれもモジュールの設計適格性確認と形式認証のための要求事項を規定したもので、両者の違いは太陽電池の種類（結晶シリコン系か薄膜系）の違いである。これらの JIS 規格には、機械的強度に関する試験方法（10.16「機械的荷重試験」）が示されている。この試験はモジュールの風、雪、静的荷重または氷荷重に対する耐久性を調べることを目的とし

ており、試験方法は、モジュールの表面および裏面に対して交互に 2,400Pa の垂直荷重（雪及び氷荷重を考慮する場合は 5,400Pa の垂直荷重）を一時間載荷する試験を 3 回繰り返すものである。なお、この試験の要求事項は、主に電氣的性能についての内容であるが、構造的（機械的）性能については、著しい目視上の欠陥（破損、亀裂等）がないこととしている。つまり、ここでの要求は 2,400Pa（あるいは 5,400Pa）の載荷後において若干の変形は許容するということなので、許容応力度設計用の耐力評価には適用できないことが分かる。

3. 4 農林水産省関連法令

再エネ特措法の施行以降、農地に支柱を立て、その上部空間を利用して太陽光発電事業を開始する事例（営農型 PV システム。「ソーラーシェアリング」とも呼ばれる）が現出したため、農林水産省農村振興局は 2013 年 3 月、このような PV システムの取扱いに関する通知（24 農振第 2657 号）を発出した。これによれば、農地に支柱を立てて PV システムを設置する場合には、支柱の設置に対する都道府県知事または農林水産大臣一時転用許可が必要であり、そのためには以下を満たす PV システムの支持物とする必要があるとしている。

- ・簡易な構造で容易に撤去できる支柱であり、かつ支柱の面積が必要最小限であること
- ・下部の農地における営農の適切な継続が確実で、パネルの角度、間隔等からみて農作物の生育に適した日照量を保つための設計となっており、支柱の高さ、間隔等からみて農作業に必要な機械等を効率的に利用して営農するための空間が確保されていること

これらの要求は、一般的な地上設置型 PV システムより厳しいものであり、安全かつ経済的な支持物の構築が難しいため、現状での営農型 PV システムは安全性を軽視したものが多くみられる。また、営農型 PV のようにモジュールの設置位置が高く、かつ疎らに配置する場合の PV アレイの風力係数は現時点では明らかになっていないので、設計風荷重設定に関する課題も残されている。

3. 5 その他の法令

PV システムの増加と設置場所の減少に伴い、傾斜地に設置するケースも増えつつある。傾斜地に設置される PV システムにおいて、土地の造成工事が一定規模に及ぶ場合には、宅地造成法や砂防三法（砂防法、地すべり等防止法、急傾斜地法）などの造成に関する規制を受けるので、がけ崩れ、地すべり、土砂流出等を防止するための措置を講じる必要がある。

また民法では、第 717 条で「工作物責任」を定めている。その第 1 項では「土地の工作物の設置又は保存に瑕疵があることによって他人に損害を生じたときは、その工作物の占有者は、被害者に対してその損害を賠償する責任を負う。ただし、占有者が損害の発生を防止するのに必要な注意をしたときは、所有者がその損害を賠償しなければならない。」としており、PV システムの所有者あるいは占有者は、工作物責任を自覚してその設備を施設し維持しなければならない。

4. 耐風設計マニュアルの概要

PV システムの構造安全に関しては、電事法や建基法などの規制を受けるが、それらの最低要件を満足させるための技術資料は不足しており、また台風や突風などによる被害が増加していることもあり、耐風設計マニュアルの作成は急務であった。同マニュアルは、PV システムの構造設計に関する全てを網羅しているわけではないが、適切な耐風性能を確保するために必要な耐風設計法と耐風性能評価法やそれらの技術的背景について解説するものである。

耐風設計マニュアルは、PV システムの変遷や事故事例（1 章）、関連法規（2 章）、設置工法と構造形式（3 章）、風荷重算定の基本（4 章）、耐風設計（5 章）、風洞実験による風荷重評価（6 章）、載荷試験による耐力評価（7 章）、風力係数に関する文献紹介とその活用方法（8 章）、今後の課題（9 章）の全 9 章から構成されている。特に、設計者が誤りやすい風荷重算定に関しては、基本原理や現象、算定式の根拠について解説している（4、6、8 章）。また、耐風設計（5 章）についてはその要点を詳述し、末尾の付属資料には具体的な設計事例を示した。さらに、実物システムの耐力評価に有効な載荷試験の方法や実施例（7 章）についても紹介した。

本設計マニュアルが有効活用され、PV システムの強風災害の低減の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 中川他, 地上設置型太陽電池パネルの設計用風力係数（その 2:アレイ群の風力係数及び設計用風力係数の提案）, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.169-170, (2013)
- 2) 高森他, 建築物上に設置される太陽電池アレイの設計用風力係数（その 1:寄棟屋根に設置される場合）, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.221-222, (2015)