

# 太陽光発電設備の被害事例と補強の方向性

## Damage examples of photovoltaic mounting systems and direction of reinforcement methods

高森浩治\*

### 1. はじめに

電気事業法における太陽光発電設備の構造強度に関する規定は、2006年に電気設備の技術基準の解釈（略称：電技解釈）の第46条第2項として追加された。そこでの要求は、「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」としており、同JISでは主に建築物上に設置されるPV設備を想定した規定であった。当時は地上設置型のPV設備は珍しく、研究目的に導入された設備が多かったため、直接基礎（コンクリート基礎）と重量鉄骨で構成された頑強な支持物であった。その後、東日本大震災を契機として2012年に再エネ特措法（FIT法）が導入され、太陽光発電ビジネスが急激に発展した。これに伴い、地上設置型のPV設備が増したが、その多くは事業の採算性を理由にFIT制度導入以前のPV設備と比べて冗長性の低い設備へと変化していった。なかには電技解釈での要求性能を満たしていない設備も見られ、それらは地震、強風、積雪、豪雨などの自然事象によって損壊する事故を発生させている。このような背景から、PV設備の構造強度に関する規制が進められ、数回の電技解釈の改正を経て、2021年4月に発電用太陽電池設備の技術基準を定める省令（略称：太技省令）が制定された。これらの電技解釈の改正や省令の整備によって、PV設備の構造強度に関する要求性能が明確化されてきた。一方、それらの要求性能を満たすための構造設計や施工方法については、日本風工学会やNEDOの研究活動においてマニュアル<sup>1)</sup>やガイドライン<sup>2)~5)</sup>の作成が進められ、PV設備の構造安全性向上に寄与している。しかしながら、必要な構造強度を有しない不適切なPV設備は既に少なからず導入されており、強風や積雪等によって被害を受ける事例は後

を絶たない。被害を受けたPV設備のほとんどは、損害保険によって原状回復させているが、それだけでは同様の被害を繰り返すことになり、安定的な発電が見込めないだけでなく、損害保険料の値上がりにもつながり、発電事業の採算性にも影響が出てくる可能性がある。このような事態を回避するためにも、被害事例については、その原因を詳細に調査し、構造設計の過誤、不備、不足を明らかにするとともに、それらを補強するための方法について検討することは非常に重要である。

そこで本報では、近年に発生したPV設備の被害事例をもとに、その事故原因に関して構造設計の観点から解説するとともに、補強の方向性について考察した結果を述べる。

### 2. PV設備の被害事例と事故原因

#### 2.1 自然事象とPV設備被害の特徴

地震、強風、積雪、豪雨によるPV設備の被害の特徴を表1に示す。建築物に比べて軽量のPV設備は、地震荷重が小さいことから、地震によって被害を受ける割合は建築物よりかなり低い。その反面、軽量のPV設備は強風による被害が多く、PVアレイが架台ごと浮き上がって飛散するケースもある。

積雪被害は多雪区域（JIS C 8955では地上垂直積雪量が1m以上の地域を「多雪区域」と呼んでいる）での被害が多く、雪はその地域一帯に積もるため、発電所内のアレイが全滅するケースも少なくない。また、山地に設置された発電所は標高が高いため、行政が設定している地上垂直積雪量では積雪荷重が過少に与えられ、被害を受けるケースもある。

発電所の建設場所の減少に伴って、傾斜地にも建設されるようになり、豪雨による被害も多くみられ

\*一般社団法人構造耐力評価機構 理事

るようになった。その主要因は排水設備の不備であり、表流水によって表土が侵食されてPV設備が倒壊したり、発電所外に土砂が流出したりするケースがある。河川に近接した発電所では、河川の氾濫によってPV設備が浸水したり、流されたりするケースがある。

図1は2017年から2019年の保険金支払いのあった大規模損害事故の原因別の事故件数である<sup>6)</sup>。この統計結果では強風被害が最も多く、次いで積雪被害、豪雨被害であり、地震被害は見られない。

表1 PV設備の被害の特徴

被害原因	被害の特徴
地震	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PV設備は軽量であるため地震荷重が小さく被害事例が少ない</li> <li>・地盤の崩壊や液状化によって被害を受けるケースがある</li> </ul>
強風	<ul style="list-style-type: none"> <li>・台風での被害事例が多い</li> <li>・軽量であるため架台ごと飛散する被害が多い</li> <li>・発電所内の端部に位置するアレイが被害を受けるケースが多い</li> </ul>
積雪	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多雪地域や標高が高い地域での被害が多い</li> <li>・発電所内のアレイが全面的に破損するケースが多い</li> </ul>
豪雨	<ul style="list-style-type: none"> <li>・傾斜地の太陽光発電所の増加に伴い、斜面崩壊する事故が増加している</li> <li>・排水設備の不備による地盤の侵食や土砂流出が多い</li> <li>・河川の氾濫で浸水するケースもある</li> </ul>

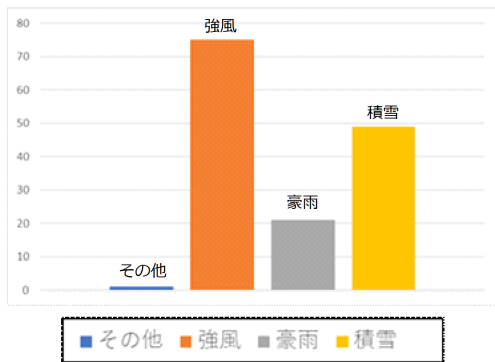


図1 保険事故件数 (事故原因別：2017～2019年)<sup>6)</sup>



図2 地震被害 (北海道：2018年)

## 2.2 地震被害の事例

図2は2018年の胆振地震(北海道)での被害であり、数少ない地震被害の事例である。架台の損傷は見られなかったが、アレイ面の角度にばらつきが見られた。南北方向に1本の支柱(杭)で支持された架台では、地震時の揺れが大きくなりやすく、杭の水平抵抗力が不足すると架台の傾きが発生する(図3)。杭の水平抵抗力は確認されていないことが多いので、構造計算や載荷試験を行って、必要な抵抗力があることを確認しておく必要がある。

## 2.3 強風被害の事例

図4は2018年12号台風によってPV設備が飛散した事例である。強風によって風上側に位置するアレイに強い負の風力(設備を持ち上げる方向の風力)が作用し、杭が抜けて飛散したと推測される。杭には引抜抵抗力が大きい(と言われている)スパイラル杭が用いられていた。杭の性能は杭の形状だけでなく地盤の性状(固さ)にも大きく影響するため、発電所の地盤が軟弱な場合には十分な抵抗力が得られない場合がある。そのため設計ガイドライン<sup>2)</sup>では引抜抵抗力はPV設備が設置される現地の地盤において杭の載荷試験を実施することを原則として

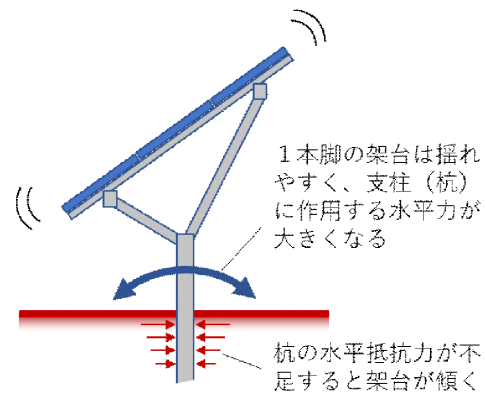


図3 地震1本支柱の架台



図4 強風被害 (静岡県：2018年)

いる。

図5は2019年台風19号の強風によって損傷したアルミニウム合金製架台の営農型PV設備である。背が高く柱間隔が大きい営農型PVの架台は、架台の変形が大きくなりやすいため、PVモジュールが押え金具から外れて飛散したと推測される。柱と梁の接合部では柱を挟み込む接合部材と柱側面との摩擦力で固定されているため、梁を持ち上げる方向の力（負の風圧力）が大きくなると摩擦が切れて接合部が抜けたと考えられる。部材間の摩擦を利用した接合部の場合、構造計算によって強度評価することは難しいため、接合部の試験体を用いた載荷試験によって強度確認することが望ましい。

柱部材の折損は、部材に作用する曲げ応力が部材の強度を超えたときに発生するが、熱処理によって

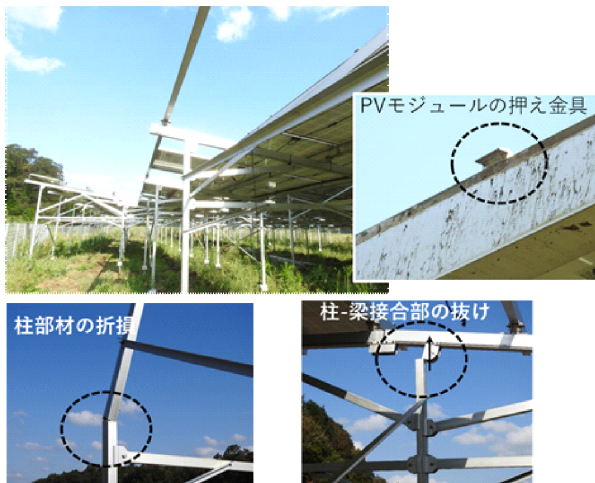


図5 強風被害（千葉県：2019年）



図6 積雪被害（秋田県：2020-2021年冬）

強度を向上させたアルミ部材は脆化する（脆くなる）ため、折れ曲がると同時に破断している。部材破断は設備の飛散に繋がるので、アルミ部材を使用する場合には強度に余裕のある部材を使用すべきである。

## 2.4 積雪被害の事例

図6は2020-2021年の冬期の積雪による被害事例であり、アレイ先端部の折損と杭の倒れが見られた。被害のメカニズムは図7のとおりで、アレイの先端部の折損は地上とアレイ面上の雪が繋がったことによる軒先荷重（沈降荷重）が原因であったと推測される。PV設備の構造設計において軒先荷重は考慮されていない場合がほとんどであり、多雪区域では同様の被害事例が多くみられる。なお、アレイ先端部で雪が繋がらない条件としては、アレイ先端部の高さを地上垂直積雪量の2倍程度の高さにする必要

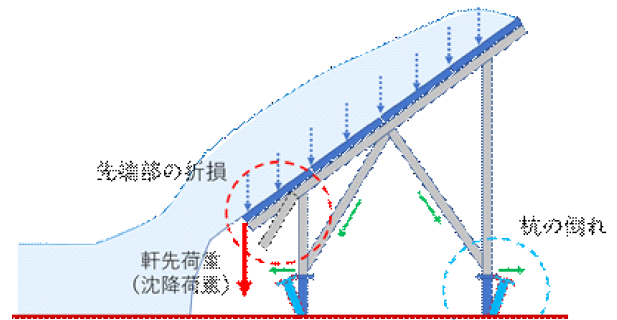


図7 積雪被害のメカニズム

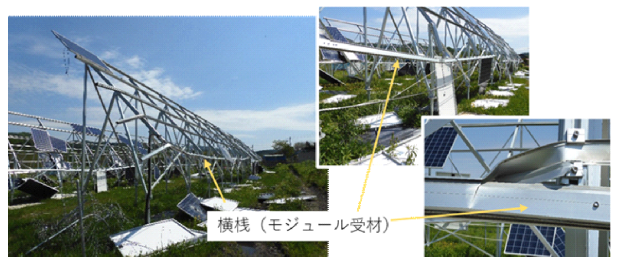


図8 積雪被害（北海道：2020-2021年冬）

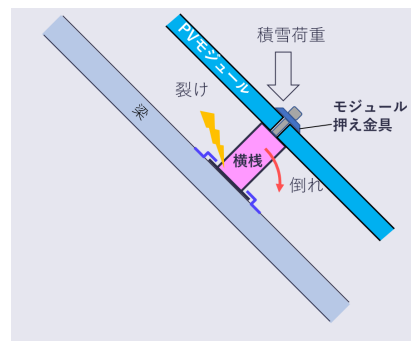


図9 横棧の倒れのメカニズム

がある<sup>7)</sup>。

図8は2020-2021年の冬の積雪被害であり、PVモジュールを受ける横棧が下方方向へ倒れ、PVモジュールが脱落した事例である。この横棧は背が高く、梁の上に設置されているため、PVモジュールからの積雪荷重が作用すると横棧には下方方向へモーメントが作用し、倒れが発生したと推測される(図9)。構造設計においては、フレーム解析(架構の部材と接合部を線材と節点で再現し、各部材に作用する応力と変形を算出する解析手法)が広く用いられており、接合部での偏心(部材間の軸心のズレ)は再現されないため、偏心によって生じる付加的な力の影響が設計上の盲点となっているケースが多い。また、横棧の倒れが生じることによって、押え金具で固定されているPVモジュールが脱落し、被害を増大させている。

図10も2020-2021年の冬期における北海道での積雪被害であり、下段のPVモジュールが全て損傷している。多雪区域においては耐圧強度が5400PaのPVモジュールを用いられていることが多いが、積雪量が2m程度でPVモジュールの耐圧強度を超えることになる。積雪量が2mを超える地域では、PVモジュールの選定に注意が必要である。

## 2.5 豪雨被害の事例

図11は2018年の西日本豪雨での地盤崩壊による



図10 積雪被害(北海道:2020-2021年冬)

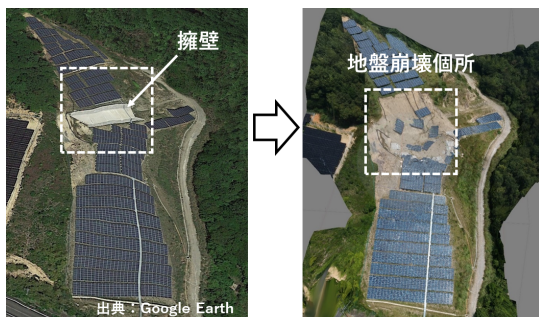


図11 豪雨による斜面崩壊(兵庫県:2018年)

被害であり、発電所の傾斜地盤の中腹に設けられている擁壁が崩壊し、その上下の傾斜地盤も連鎖的に崩壊させていた。擁壁が崩壊した原因は擁壁の構造的な不備であると考えられる。一般的な擁壁では図12のように擁壁裏側の水抜き工や裏込材(栗石や砂利)が設けられるが、事故後の様子を見る限りではそれらが設けられていなかったか、十分でなかったと考えられる。

図13は2020年7月の熊本豪雨での被害であり、傾斜地盤の表土が侵食されて杭の一部が露出している。また、排水溝の損傷によって排水処理能力が低

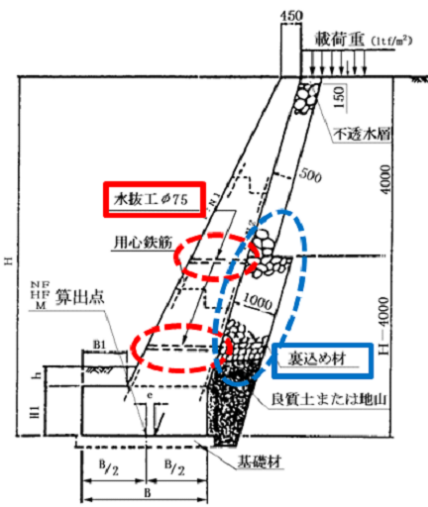


図12 一般的な擁壁の構造(設計便覧 第3編道路編<sup>8)</sup>より)

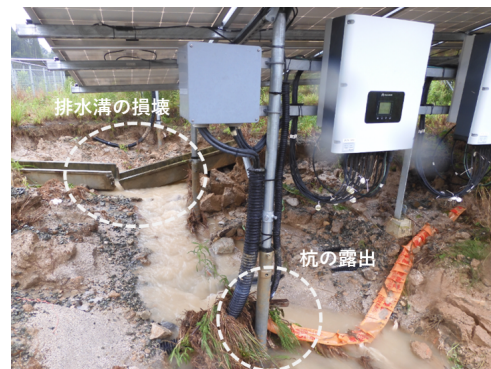


図13 豪雨による地盤侵食と排水溝の損傷(熊本県:2020年)



図14 河川氾濫による被害

下したため侵食をさらに拡大させていた。地盤の侵食については、日常的な降雨によっても進展し、大規模な土砂災害に繋がる恐れもあるので、排水計画の不備や不足がある場合には、専門家に相談のうえ改善することを推奨する。

図14は2020年の熊本豪雨において球磨川の氾濫によって浸水したPV設備である。この地域では地上5mの高さまで水位が上昇したため設備は完全に水没したが、流速が遅かったため基礎や架台はほぼ無損傷であった。ただし、PVモジュールやPCSなどの電気設備は全損であったと思われる。洪水による浸水地域は国土地理院が提供している「重ねるハザードマップ」<sup>9)</sup>を利用することによりWeb上で簡単に調べることができる。土砂災害、津波、高潮などのリスクがある地域も調べることができることから、発電所の初期計画段階において当該立地条件での災害リスクを把握することで災害を回避できるケースも少なくない。

## 2.6 構造・土木の被害の特徴

架台、基礎、地盤の観点から被害の特徴をまとめると次のとおりである。

### ○架台被害の特徴

- ・接合部の破損が多い（接合部の構造計算がされていない場合が多い）
- ・設計荷重に誤りがある場合には主要な部材が破損する

### ○基礎被害の特徴

- ・杭基礎の抵抗力不足による被害が多い
  - 強風によって杭基礎が引抜ける
  - 積雪によって杭基礎が倒れる

### ○地盤被害の特徴

- ・不十分な排水設備によって地盤が侵食し、土砂流出する場合がある
- ・造成工事の不備によって擁壁や斜面が崩壊することがある
- ・点検保守の緩怠で地盤の侵食が進行し、深刻な事態になるリスクが高まる

これらの特徴を把握することによって、被害を受けた設備や導入済み設備の補強方法について的確に判断することができる。また、新設されるPV設備においては設計内容の再確認を行うことで事前にリスクを回避することができる。

## 3. PV設備の補強の方向性

被害調査によって得られた情報は、PV設備の補

強を検討する上での有益なヒントになるが、PV設備を補修・補強する工法は未だ確立されていないため、上述した被害事例をもとに設備の部位毎についての補強の方向性について検討してみる。いずれもオーソドックスな考え方であるが、材料コストや施工の工数などを考慮することで、実用的な工法や製品になり得るであろう。

### 3.1 部材の補強

損傷した部材の補強を考える場合、部材の断面性能を向上させる方法（図15）と部材の応力（部材に作用する力）を低減する方法（図16）に大別される。

部材の断面性能を向上させる方法としては、部材の材厚を増す方法と部材寸法を増す方法がある。前者では、他の部材との接合部の仕様を変更することなく部材を交換することができる。その反面、材料コストが大きくなりやすい。後者では、荷重方向の寸法を増すことによって材料のコストアップを抑制できるが、その他の部材との接合部の仕様（接合部材など）を変更せざるを得ない場合がある。

部材の応力を低減させる方法としては、部材の支点間距離（当該部材を支えている部材の間隔）を小さくして他の部材に応力を分散させることが一般的である。例えば、図16のようにアレイ先端部の部材の折損の場合、当該部材の先端部に支点を設けるためにブレース（斜材）を追加し、応力を分散させている。部材を追加する場合には、その部材の強度を確保するだけでなく、部材の追加によるその他の部材への応力の再分配の影響についても確認しておく必要がある。

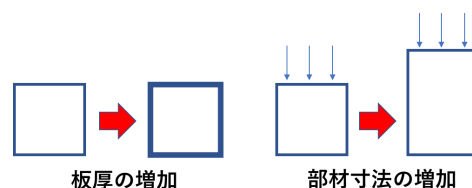


図15 部材の断面性能の向上

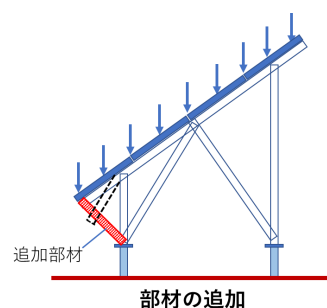


図16 部材応力の低減

### 3.2 接合部の補強

接合部の補強方法として、接合部の滑り（ズレ）を抑える方法と部材の変形を抑制する方法について検討してみる。図17は、アルミ合金製架台で多く見られる接合部の補強の例であり、(a)はT型溝とスロットナットによる接合部、(b)は長孔（ルーズホール）を用いた接合部である。いずれも部材間の摩擦によって固定されているため、摩擦が切れると滑り（ズレ）が生じ、部材間の力が十分に伝達できなくなる。そこで、接合部での滑りが生じないように、貫通ボルトやズレ止めプレート等を追加して接合部の固定度を向上させている。

図18は、図8および図9に示した積雪荷重によって損傷した横棧の補強方法の例である。部材の倒れる方向に補強部材（倒れ止め金具）を追加する単純な方法であるが、横棧の断面性能を向上させるより経済的な方法である。

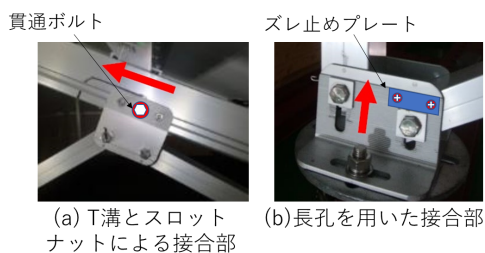


図17 アルミ合金製架台で見られる接合部の補強

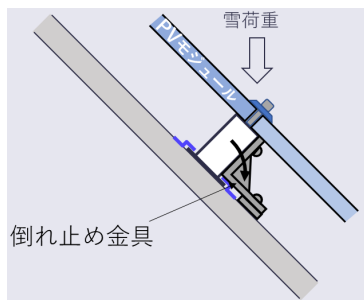


図18 横棧の補強（倒れ止め）

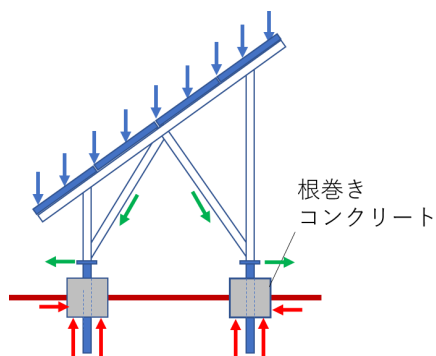


図19 根巻きコンクリートによる杭の補強

### 3.3 杭基礎の補強

近年のPV設備で広く使用されている杭基礎の補強について検討する。図19は根巻きコンクリートによる補強方法であり、杭の周りにコンクリートを打設することによって、鉛直方向の抵抗力を向上させるだけでなく、根巻きコンクリートを大きくすることで引抜方向の抵抗力を向上させることができる。また、根巻きコンクリートを根入れ（土中への埋設）することで水平方向の抵抗力向上も可能である。

図20は、図6および図7に示した積雪によって倒れた杭の補強方法の例である。杭に作用する水平方向の力は、前後の支柱の柱脚を連結する部材を追加することで低減させることができるので、杭の倒れを防止することができる。鉛直方向の抵抗力に問題がない場合には、根巻きコンクリートによる補強より合理的かつ経済的な方法である。

### 3.4 地盤の補修

傾斜地盤での侵食や崩壊など被害の多くは排水設備と法面保護の不備・不足が原因であるため、排水溝の整備（図21）や植生工（種子散布）の実施（図22）が有効である。急傾斜地盤の崩壊の危険性がある場合には、擁壁の設置も考える必要がある。侵食が進行している場合や斜面崩壊の危険性がある場合には、PV設備の撤去を伴う大規模な工事になるが、効果的かつ効率的な補修工事を進めるために専門家の指導を受けることを推奨する。なお、地盤のトラブルの多くは予兆があるため、保守点検で異状が確認された場合には、早期に対応することで補修費用

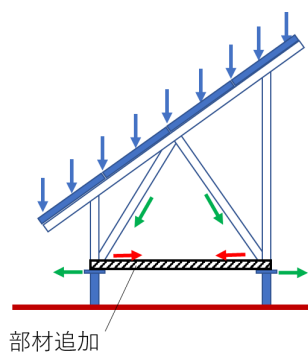


図20 部材追加による杭の補強



図21 排水溝の整備



図22 植生工（種子散布）

を軽減することができる。

#### 4. おわりに

電気事業法でのPV設備への要求は、再現期間50年の荷重（50年に1回程度発生する台風や積雪等の自然事象の際に生じる力）に対して損傷しないこととしているが、過去の被害のほとんどはそのような自然事象に及ばない状況下で発生している。被害原因の多くは構造設計の過誤や不備・不足であり、事故状況を詳細に調査することでそれらは明らかになる。そこで得られる知見は、当該設備の補修・補強だけでなく、新たに導入される設備にも積極的にフィードバックされるべきであるが、被害に関する情報は閉鎖的に処理されることが多く、現状では被害の低減に繋がっていない。

一方、PV設備の補修・補強に関しては効果的かつ経済的な技術は未だ確立されていない。建築、土木、機械などの他分野での先行技術を積極的に活用・応用し、PV設備に有用な補修・補強技術を開発することが当面の課題である。

#### 謝辞

被害調査および研究成果の一部は、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）で得られたものである。ここに感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本風工学会 太陽光発電システム風荷重評価研究会編、太陽光発電システム耐風設計マニュアル、(2017)
- 2) NEDO, 太陽光発電協会, 奥地建産, 地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019年版, (2017)
- 3) NEDO, 産業技術総合研究所, 構造耐力評価機構, 八千代エンジニアリング, 太陽光発電協会, デロイトトーマツコンサルティング, 傾斜地設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドラ

イン 2019年版, (2019)

- 4) NEDO, 産業技術総合研究所, 構造耐力評価機構, 八千代エンジニアリング, 太陽光発電協会, デロイトトーマツコンサルティング, 営農型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2019年版, (2019)
- 5) NEDO, 産業技術総合研究所, 構造耐力評価機構, 八千代エンジニアリング, 太陽光発電協会, デロイトトーマツコンサルティング, 水上型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2019年版, (2019)
- 6) NEDO, 産業技術総合研究所, SOMPO リスクマネジメント, 構造耐力評価機構, 太陽光発電協会, 2019年度成果報告書: 太陽光発電システム長期安定電源化基盤技術開発/太陽光発電設備の信頼性・安全性向上有効技術の評価/太陽光発電設備の信頼性・安全性向上の技術評価およびガイドライン策定に関する企画立案, (2020)
- 7) NEDO, 太陽光発電協会, 奥地建産, 地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019年版 技術資料B, (2017)
- 8) 国土交通省, 設計便覧 第3編道路編 第3章擁壁, [https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/jigyousya/technical\\_information/consultant/binran/etsuran/qgl8vl0000005ecr-att/sekkei03\\_03.pdf](https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/jigyousya/technical_information/consultant/binran/etsuran/qgl8vl0000005ecr-att/sekkei03_03.pdf)
- 9) 国土地理院, 重ねるハザードマップ, <https://disaportal.gsi.go.jp/index.html>

#### 著者略歴



高森浩治（たかもり こうじ）  
建築物の試験研究機関、太陽光架台のメーカーを経て2019年に構造耐力評価機構に入社、2020年に同機構の理事に就任。2015年に大阪市立大学大学院後期博士課程を修了、博士（工学）を取得。建築物や太陽光発電システムの耐風設計を専門とする。