

モジュールの耐圧試験（短期および長期載荷）

Pressure Loading Test for Photovoltaic Module
(Short-term and Long-term Loading)

奥地丈浩*・高森浩治*

1. はじめに

太陽電池アレイ用支持物は電気事業法の規制を受け、その構造設計は JIS C 8955:2017¹⁾ が適用される。JIS C 8955:2017¹⁾ では、設計風荷重の算出方法と、その荷重に対する許容応力度設計の要求を規定している。太陽電池モジュール（以後、モジュールと称する）を支持する架台等はこれに従って設計される。当然のことながら、太陽電池モジュールに対しても許容応力度設計が求められるが、多くのモジュールメーカーは許容耐力や限界耐力などのデータが明確に示されていない。また、JIS C 61215-2:2020²⁾ の機械的静荷重試験では、モジュールメーカーが定義する設計荷重を検証する方法が規定されている。その設計荷重は、試験荷重を安全係数で割った値で、安全係数は 1.5 以上と定義されている。一般的に流通しているモジュールの仕様書が示す耐荷重値はモジュールメーカーによって表記が異なっており、仕様書に示す耐力荷重値が試験荷重か設計荷重であるか精査する必要がある。これまでに、モジュールの面積が 1.6m² 程度のモジュールについては、耐風圧試験で性能を評価した研究が報告されている^{3), 4)}。近年、モジュールは、モジュールのセルの大型化に伴い、モジュールの面積も大型化している。そこで本試験では、モジュールの面積が 2m² を超えるような大型のモジュールの耐風圧試験結果の拡充を行うことを目的とし、大型のモジュールを対象に耐風圧試験を実施し、モジュールの耐風圧性能および裕度について把握する。

2 章では、メーカーの異なる 4 種類のモジュールについて短期的な荷重の耐風圧試験を行い、耐風性能を評価した結果について報告する。その結果を踏まえ、3 章では、メーカーの異なる 2 種類のモジュールについて長期的な荷重の耐力試験を行い、長期の

耐力性能を評価した結果について報告する。

2. 耐風圧試験（短期荷重）

本試験では、モジュールの短期許容耐力を確認するために荷重を均一に圧力で印加する耐風圧試験装置を用いて実施する。

2.1 試験概要

試験に供した 4 種類のモジュールを表 1 に示す。試験体数は 1 種類につき負圧 3 体、正圧 3 体とした。モジュールの大きさは主に幅 2020 ± 20mm × 奥行 1000 ± 10mm × 厚さ 35 ± 5mm の範囲にあり、アルミニウム製の枠（モジュール枠）の内側に太陽電池パネルがはめ込まれている。また、大型のモジュールとの比較をするためにモジュールの大きさが幅 1740mm × 奥行 1030mm × 厚さ 32mm の試験体も同様の条件で実施した。

モジュールの耐風圧試験装置への固定は、実施工と同様にメーカー指定の M8 ボルトセットを用いて、モジュール枠に設けられているボルト孔の位置で固定した。なお、正圧においては、圧力載荷時にモジュールのガラス面のたわみによって、モジュールを支持している部材に接触することを防ぐために図 1 に示す嵩上げ用のブロック（高さ 100mm）を

表 1 耐風圧試験（短期荷重）の試験体

モジュール 記号	太陽電池モジュール仕様				仕様書耐荷重値	
	長さ (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)	固定ボルト × 固定箇所数	正圧 (kPa)	負圧 (kPa)
A	2035	1006	30	M8×4箇所	5.4	▲ 2.4
B	2008	1002	40	M8×4箇所	5.4	▲ 2.4
C	2008	1002	40	M8×4箇所	3.6	▲ 1.6
D	1740	1030	32	M8×4箇所	5.4	▲ 4.0

*一般社団法人構造耐力評価機構

(〒541-0057 大阪府大阪市中央区北久宝寺町 4 丁目 2 番 10 号
東明ビル 4 階)

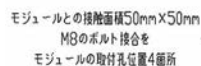


図1 嵩上げ用のブロック

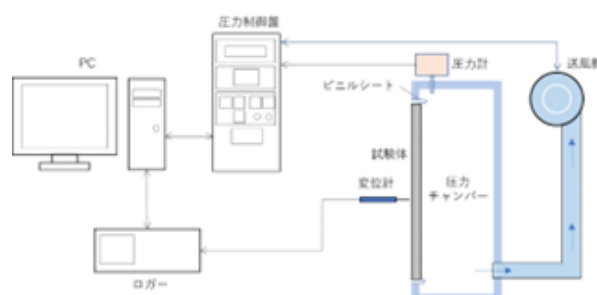


図2 耐風圧試験装置の模式図

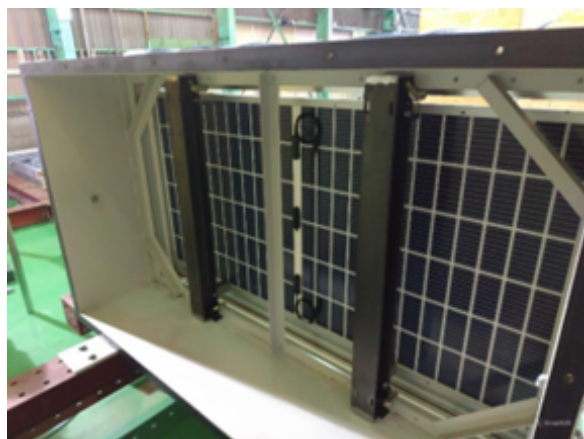


写真1 耐風圧試験（正圧）のモジュール取付風景

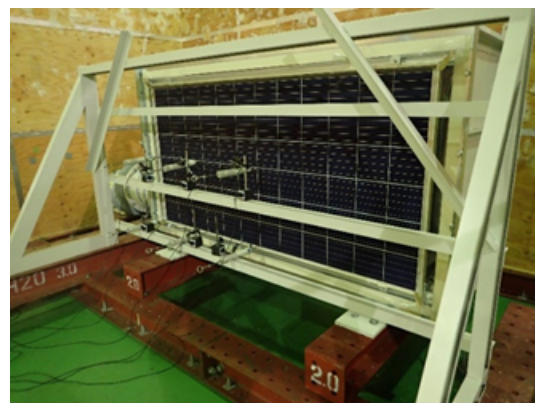


写真3 耐風圧試験の風景

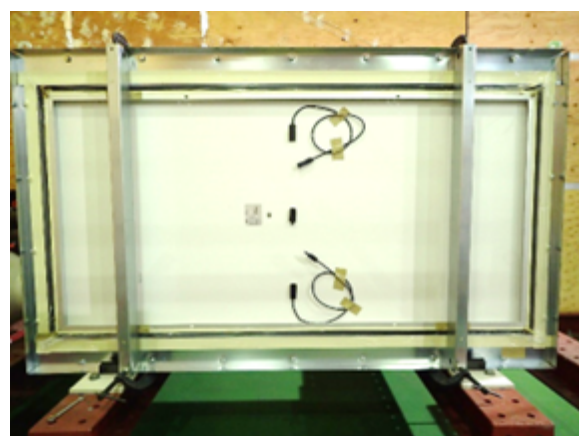


写真2 耐風圧試験（負圧）のモジュール取付風景

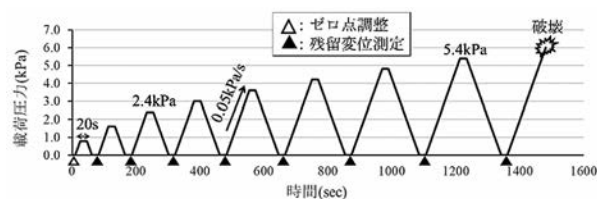


図3 耐風圧試験の載荷手順

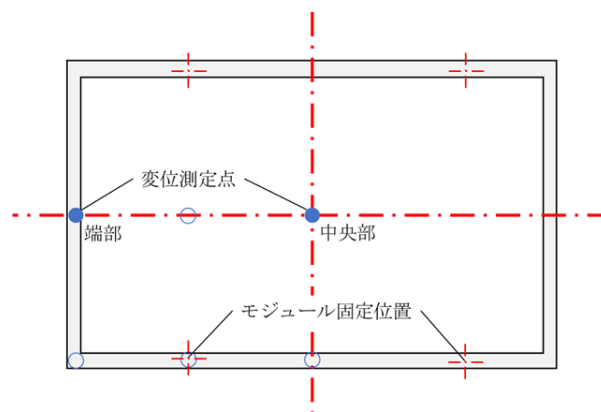


図4 変位測定位置

用いた (写真1, 写真2).

取付ボルト孔は、いずれのモジュールも長辺に2箇所ずつの計4箇所であるが、メーカーによりボルト穴の間隔は若干異なる。また、表1に示すモジュールの耐荷重は仕様書に示された値であるが、JIS C 61215-2:2020²⁾に従って確認されたものも含まれていることから、JIS C 8995:2017¹⁾で要求される許容応力度設計用の耐荷重（許容耐力）とは異なるものもあると考えられる。

モジュールの耐風圧試験には、図2に示す模式図の弊機構の耐風圧試験装置を用いた（写真3）。耐

風圧試験での載荷手順を図3に示す。なお、載荷圧力は、正圧載荷の場合はモジュールの面外方向の下向きを正とし、負圧載荷の場合はモジュールの面外方向の上向きを正とした。

載荷の加減圧速度は、0.05kPa/s とした。モジュールの変位測定は、図4に示すモジュールの中央と端

部の2箇所とし、正圧はモジュールの面外方向の下向きを正とし、負圧はモジュールの面外方向の上向きを正とした。また本試験では、多くのモジュールが耐荷重として表示している2.4kPaと5.4kPaを載荷したのちに残留変位を測定し、弾性範囲内にあるか(残留変位がないか)の確認を行った。その後、試験体が破壊するまで載荷し、終局耐力の確認を行った。

2.2 試験結果

各試験体についての2.4kPaおよび5.4kPa載荷後の残留変位、および終局耐力の一覧を表2に示す。いずれのモジュールも、正圧負圧の試験体3体ではばらつきが比較的小さかったため、表2の数値は3体の平均値を示した。

また、モジュールの破壊形態は、モジュール枠の固定ボルト付近の破壊と、パネルがモジュール枠から抜け出す破壊の2つに分類されることから、ここでは前者の破壊モードを“a”，後者を“b”と定義した。破壊モードaおよびbの事例を写真4～写真6に示す。表2に示す破壊モードについては、モジュールD以外は試験体3体で同じ破壊モードであったが、モジュールDは破壊モードa、bが混在した。

これらの結果によれば、多くのモジュールメー

カーが耐荷重として表示している2.4kPaを載荷した後の残留変位は、いずれのモジュールもごく僅かであることが分かる。5.4kPaを載荷した後の残留変位は、モジュールC(正圧)、D(正圧)で10mm以上のやや大きい値を示しており、これらのモジュールでは枠のボルト固定部が塑性変形していることを確認している。モジュールA(正圧)、B(負圧)、C(負圧)は5.4kPa以下で破壊した。

2.3 耐風性能評価

全モジュールの正圧載荷による破壊荷重を図5に示し、負圧載荷による破壊荷重を図6に示す。同図には表1の仕様書耐荷重を実線で示し、過去に同様の試験方法で行った耐風圧試験結果である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⁴⁾の技術資料F(太陽電池モジュールの耐風性能試験)と比較をするために過去試験データとして示し、過去試験データの平均値を一点鎖線で、本試験データの平均値を破線で示す。

この結果によれば、本試験のモジュールの破壊荷重は全体的に過去試験データの破壊荷重より下回っており、また、平均値を比較すると仕様書耐荷重から破壊荷重までの裕度が小さい。太陽光発電システムの安全率(=終局耐力/許容耐力)は、1.5～3.0以上が推奨されているが⁵⁾、本試験がモジュール単体の部分試験であることを考えると安全率はやや高

表2 耐風圧試験結果

試験 条件	モジュール 記号	残留変位 (mm)				破壊荷重 (kPa)	破壊モード
		2.4kPa載荷後		5.4kPa載荷後			
		中央部	端部	中央部	端部		
正圧	A	0.5	0.1	—*1	—*1	5.4	a
	B	0.0	-0.7	2.5	0.4	6.3	a
	C	1.2	0.4	11.5	1.6	5.5	a
	D	1.3	0.6	19.6	11.7	7.3	a
負圧	A	1.2	0.9	5.7	3.5	7.3	b
	B	0.4	0.5	—*1	—*1	3.2	a
	C	1.1	1.5	—*1	—*1	3.0	a
	D	1.5	1.2	7.8	6.1	5.4	aまたはb

破壊モードa：モジュール取付位置のアルミ枠破壊、b：アルミ枠からのパネルの抜け
*1：5.4kPa以下で破壊したため測定データなし。

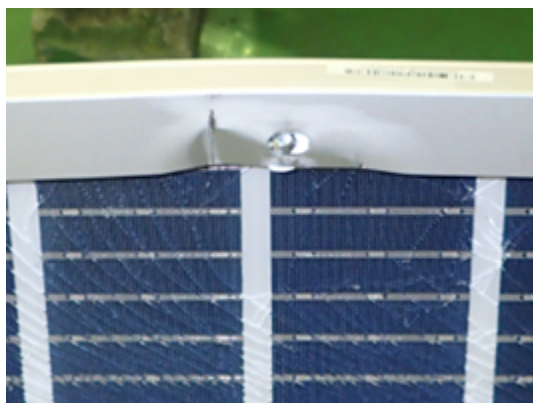


写真4 正圧の破壊状況（試験体A：破壊モードa）

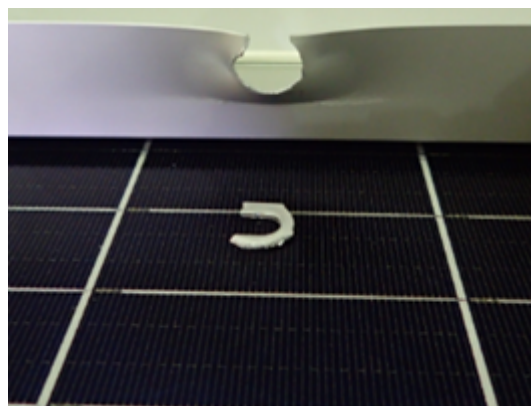


写真5 負圧の破壊状況（試験体C：破壊モードa）

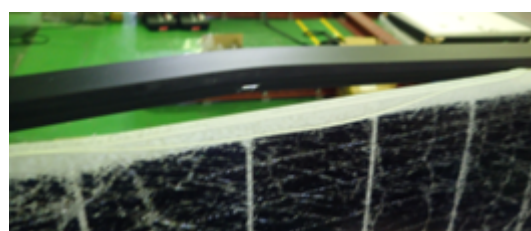


写真6 負圧の破壊状況（試験体D：破壊モードb）

めに設定する必要があると考える。

本試験結果では、大型のモジュールの裕度は、過去試験結果（1.6m²のモジュール）と比べて低下傾向であった。なお、試験体D（1.7m²のモジュール）は、仕様書耐荷重の値が過去試験体より大きいため、仕様書耐荷重から破壊荷重までの裕度は小さかったが、正圧・負圧荷重ともに過去試験データと同程度の破壊荷重値を示している。

3. 砂袋荷重試験（長期荷重）

本試験では、砂袋を用いて多雪地域で想定される長期的な積雪荷重を模擬し、モジュールの長期許容

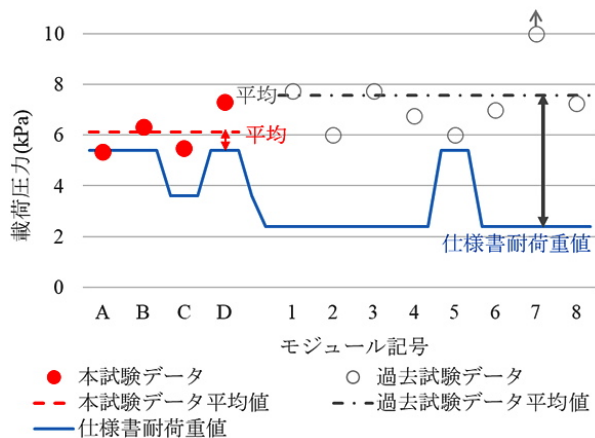


図5 モジュールの破壊荷重（正圧）

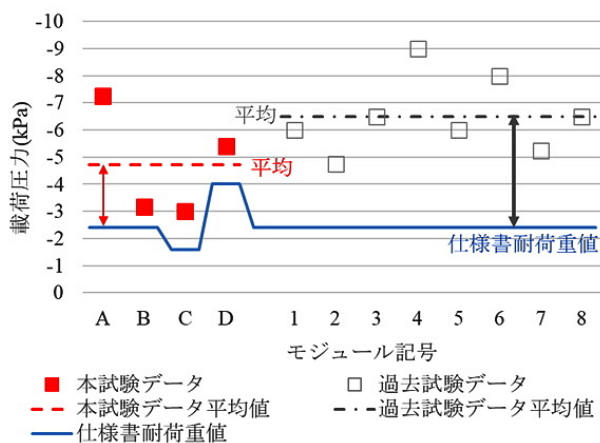


図6 モジュールの破壊荷重（負圧）

表3 砂袋試験（長期荷重）の試験体

モジュール 記号	太陽電池モジュール仕様				仕様書 耐荷重値
	長さ (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)	固定ボルト × 固定箇所数	
X	1650	991	40	M8×4箇所	5.4
Y	2008	1002	40	M8×4箇所	3.6

耐力に関する強度評価を調査した。

3.1 試験概要

表3に示すサイズの異なる2種類のモジュールを試験体（写真7、写真8）として選定し、砂袋による荷重を行った。長期荷重荷重は、各モジュールの仕様書に示される耐荷重値の1/1.5として、それぞれ2.4kPa、3.6kPaの2種類とした。

砂袋の荷重期間は長期の積雪荷重を想定し、1年間のうちの3か月間とし、荷重時と荷重中（3か月間）の変位測定と荷重を取り除いた際の残留変位測定および目視による観察を行った。なお、変位測定は2章の耐風圧試験（短期荷重）と同様にモジュールの中央と端部の2箇所とし、モジュールの面外方向の下向きを正とした（写真9）。

モジュールの取付方法についても2章の耐風圧試験（短期荷重）の正圧と同様にモジュールを支持している部材に変形時モジュールのガラス面が接触することを防ぐために嵩上げ用のブロック（高さ



写真7 60セルモジュール（面積：1.6m²）

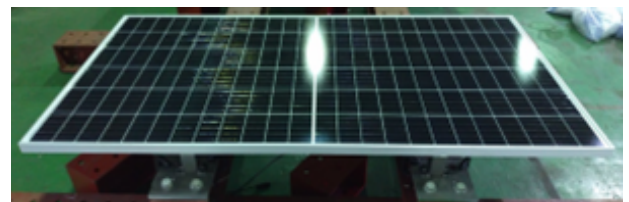


写真8 ワイドモジュール（面積：2.0m²）

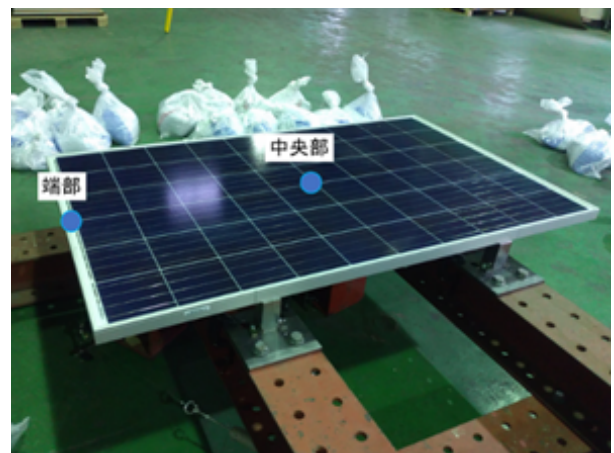


写真9 変位測定位置

100mm)を用いた(写真10)。

砂袋は、1袋あたり15kgとし、各モジュールの載荷荷重(2.4kPa, 3.6kPa)がモジュール面へ均等に載荷されるように砂袋を積載した(写真11～写真14)。モジュールの変位測定は、3か月間載荷したのちに残留変位を測定し、弾性範囲内にあるか(残留変位がないか)の確認を行った。

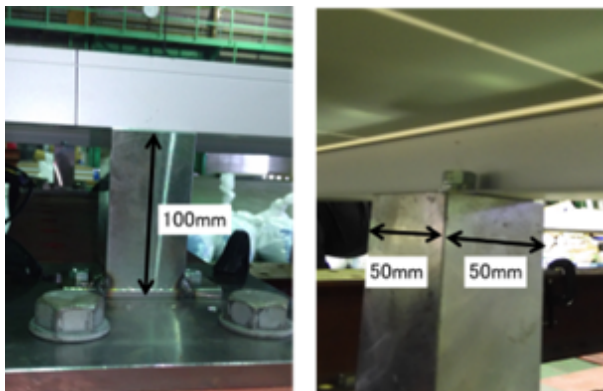


写真10 砂袋試験のモジュール取付の風景



写真11 砂袋載荷(試験体X: 2.4kPa)



写真12 砂袋載荷(試験体X: 3.6kPa)

3.2 試験結果

載荷開始1時間後からのモジュールの変位増加量を図7に示す。このことから、砂袋の積載後に長期的な荷重によってモジュールの変形量が増加していることがわかる。また、載荷時の変位測定結果および荷重を取り除いた時の残留変位測定結果については、短期荷重試験の結果と比較して表4に示す。

砂袋を載荷した直後の太陽電池モジュールの変位は短期荷重の試験結果と比較して大きな違いはなかったが、徐々に変位が増加し、3か月後の試験終



写真13 砂袋載荷(試験体Y: 2.4kPa)



写真14 砂袋載荷(試験体Y: 3.6kPa)

表4 長期荷重および短期荷重載荷試験結果の比較

モジュール 記号	モジュール 仕様	載荷 (kPa)	試験 条件	載荷時変位 (mm)		残留変位 (mm)	
				端部	中央	端部	中央
X	60セル L1650mm W991mm H40mm	2.4	短期	15.4	27.7	0.3	1.0
			長期	18.5	28.2	2.7	3.8
		3.6	短期	25.1	39.6	0.7	2.2
			長期	29.6	42.6	4.6	5.3
Y	72セル L2008mm W1002mm H40mm	2.4	短期	31.8	44.3	1.4	0.2
			長期	35.5	46.4	5.9	5.9
		3.6	短期	49.4	67.4	3.0	1.2
			長期	48.0	71.7	7.6	6.1

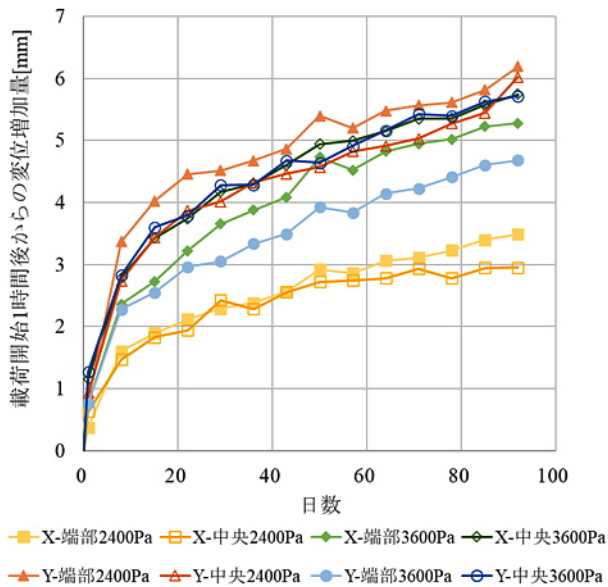
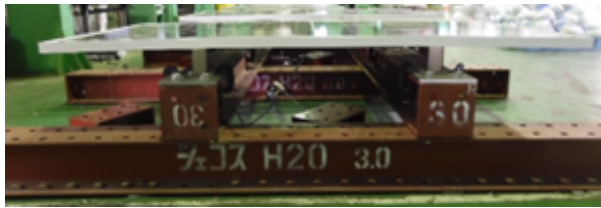


図7 荷重開始1時間後からの変位増加量



i. 試験体 Y の除荷後全体



ii. アルミフレーム変形位置拡大（i. の破線位置）

写真15 モジュール除荷時の状況

了時には全ての太陽電池モジュールで短期荷重の試験結果より変位、残留変位ともに大きくなる傾向が得られた。目視による観察では、ガラス割れはなかったが、ボルト固定部付近でアルミフレームに塑性変形がみられた（写真15）。

3.3 耐力性能評価

本試験では1年間のうち積雪期間の3か月を想定して荷重試験を行ったが、多雪地域に設置しているアレイ支持物では毎年同じような長期荷重が繰り返して作用し、モジュールのガラス割れ等による破損も懸念されるため、多雪地域に太陽光発電所を設置

する際はモジュールの長期荷重に関する強度特性についても調査することが望ましい。

4. まとめ

メーカーの異なる4種類の太陽電池モジュールについて耐風圧試験を行った結果、過去の試験結果である60セルモジュール（1.6m²）は多くのメーカーが耐荷重として設定している24kPaの荷重に対して、終局耐力は十分な余裕があったが、大型化したモジュールを対象とした今回の試験結果ではあまり余裕がなかった。

長期の耐力試験結果では、短期の試験結果と比較して変位量や残留変位が増加する傾向であったので、多雪区域で使用する場合には、長期荷重の影響を考慮するのが望ましい。そのためには、長期荷重によってモジュールへの影響のデータの蓄積が必要である。

謝辞

この成果は、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）の結果得られたものです。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS C 8995：2017 太陽電池アレイ支持物設計標準，2017
- 2) 日本規格協会：JIS C61215：2020 地上設置の太陽電池（PV）モジュール - 設計適格性確認及び型式認証 - 第2部：試験方法，2020
- 3) 高森浩治，染川大輔，植松 康，日本建築学会：太陽電池モジュールの耐力評価に関する研究その2 耐力評価結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，169-170（2017）。
- 4) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：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，2019
- 5) 日本風工学会，太陽光発電システム耐風設計マニュアル，2017

著者略歴



奥地 丈浩（オクヂ タケヒロ）

2010年3月関西大学工学部卒業。
同年4月奥地建産入社，住宅建材や太陽光発電設備の構造物の耐力性能評価試験評価に携わる。2021年1月より現職，主に構造体の試験関係を担当，研究員。



高森 浩治（タカモリ コウジ）

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，2023年に同機構の代表理事に就任。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。