

金属製屋根上に設置された太陽電池パネルの耐風圧試験

Wind resistant test for solar panels installed on a metal roof

梅谷信次*1、前田 豊*2、高森浩治*3、中川尚大*4、西村宏昭*5

1. はじめに

クリーンな再生可能エネルギーとして脚光を浴びる太陽電池パネルは、今後わが国でも急速に広まる可能性をもっている。太陽電池パネルの多くは建築物の屋上に設置されることが多いことから、それらの構造安全性の確保は、設置された建築物のためだけでなく、周辺の建築物や住民にとっても必要な要件である。ところが、その法的根拠は明確に知られていない。太陽電池パネルは建築基準法の適用を受ける建築部材であろうか？ その場合、太陽電池パネルをどのように設計すべきであろうか？ ここでは、わが国で多い災害のひとつとしての台風に対する設計を考える。

太陽電池パネルは建築部材であるかという問いには、特殊なケースを除いて否と答えられる場合が多いであろう。太陽電池パネルが建築部材(屋根葺き材や外装材)として建築物の一部を形成する場合(太陽電池を組み込んだ瓦や太陽電池を表面に貼ったスレートなど)は、屋根葺き材や外装材としての法的扱いが明確である。しかし一般には、太陽電池パネルとは別に屋根葺き材や外装材があり、太陽電池パネルを取り除いたとしても、それらとは別の建築部材が屋根葺き材や外装材の役目を果たすであろう。したがって多くの場合、太陽電池パネルは屋根葺き材でも外装材でもない。この場合、建築基準法で要求されるのは、「屋根ふき材等の緊結」というタイトルの基準法施行令第39条に示された「屋根ふき材、内装材、外装材、帳壁その他これらに類する建築物の部分及び広告塔、装飾等その他建築物の屋外に取り付けるものは、風圧並びに地震その他の振動及び衝撃によって脱落しないようにしなければならない。」という仕様規定である(本稿では、屋根ふき材という混ぜ文字は法律の引用に限っている)。つまり、特殊なケースを除いて太陽電池パネルは、「屋根ふき材に類する建築物の部分」であり、「脱落しないように緊結する」ことだけが要求される。屋根葺き材と帳壁は、平成12年建設省告示第1458号に基づいて設計風荷重を計算することが要求されるが、



写真1 金属製屋根葺き材に固定された太陽電池パネル

太陽電池パネルはこの風荷重の基準の適用を受けないのである。なお、国土交通省は平成23年10月1日施行の改正建築基準法施行令で、建築基準法の規制の対象となる工作物から、電気事業法により十分な安全性が確保される太陽光発電設備を除外することとしている。また、「太陽光発電設備等に係る建築基準法の取扱いについて」(平成23年3月25日国住指第4936号)の通知において、土地に自立して設置する太陽光発電設備の取扱いや屋上に設置する太陽光発電設備等の高さの算定の取扱いを明確化した。

屋根葺き材または外装材に位置付けられない太陽電池パネルが強風で飛散し、他者に危害を加えた場合の損害賠償は、建築基準法上の合法性とは別に建築主に請求される。直ちに違法性が問われないことのみで、責任が免れる訳ではない。昨今のブームにより設置された多くの太陽電池パネルは巨大台風の洗礼を受けていないこと、屋根は建築物の周りで最も大きい風荷重を受けること、そのために屋根葺き材は強風被害を受けやすいことを考えると、太陽電池パネルの風荷重に対する構造安全性の確認は、法的規制の有無に関わらず、重要であるに違いない。本稿では、金属屋根に固定される太陽電池パネル(写真1)の耐風圧性能試験について述べる。

*1 ICHIGOTANI Shinji : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐風試験室 上級専門役(兼)主査

*2 MAEDA Yutaka : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐風試験室 主査

*3 TAKAMORI Koji : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐風試験室 室長代理

*4 NAKAGAWA Naohiro : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐風試験室

*5 NISHIMURA Hiroaki : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 建築物理部長 兼 耐風試験室 室長

2. 基規準および風洞実験における太陽電池パネルの風荷重の設定

前項で述べたように、屋根上に設置される太陽電池パネルは建築物外装材の風荷重を規定する建設省告示第1458号の適用を受けないが、より高い安全性を求める設計者によって太陽電池パネルの耐風設計に用いられることがある。設計基規準に規定されないものや適用に疑問があるものは実際には数多くあるが、設計者が基準を「準用」することは多くあろう。建設省告示第1458号の外装材風荷重を太陽電池パネルの風荷重に適用する際の「怪しさ」はパネル裏面の圧力の設定にある。一般の外装材の設計では、パネルの裏面が室内に面していることを前提としているために、室内圧を考慮しなければならない。室内圧係数は外装材の外圧係数が正の値のときには-0.5、負のときには0.0を設定することとなっており、太陽電池パネルの表面の風圧係数が負のときに裏面圧係数を0.0と設定しがちであるが、太陽電池パネルは裏面も大気に開放されているので、室内圧係数を設定するのは正しくないのである。

JIS C 8955「太陽電池アレイ用支持金物設計標準」も、建築物屋根の上に設置される太陽電池パネルの風荷重を与えている。JIS C 8955は太陽電池パネルを設置する屋根勾配を関数として太陽電池パネルの設計風力係数を与えているが、外装材用ではなく構造骨組用風荷重の算定式を用いているために、結果的に小さい風荷重を与えている1)、2)。これにより、過小評価された風荷重で設計された太陽電池パネルの強風時の被害が懸念される。構造骨組用風荷重は、建設省告示第1458号ではなく、建設省告示第1454号において次式で与えられる。

$$\hat{W} = \bar{q} \times G_f \times \bar{C}_f$$

ここで、 \bar{q} は平均速度圧、 G_f は構造骨組用ガスト影響係数、 \bar{C}_f は構造骨組用平均風力係数である。ガスト影響係数は変動する荷重効果を平均値に乗じて、ピーク値に変換する補正係数である。建設省告示第1458号に基づく外装材用風荷重はピーク風力係数を直接与えるのに対し、構造骨組用風荷重は平均風力係数とガスト影響係数の積でピーク風力係数を与える。太陽電池パネルが構造骨組か外装材のいずれで設計されるのが適切であるかについては、多くの風荷重の専門家が建築物の屋根に設置される太陽電池パネルは(裏面圧の問題を解決した上で)外装材として設計される方が望ましいと答えるであろう。なぜなら、建設省告示第1454号で与えられるガスト影響係数は接近流の乱れの影響を考慮したもので、屋根の上の剥離領域内の乱れの影響を適切に表さないことが知られているからである。JIS C 8955では太陽電池パネルのピーク風力係数の風洞実験結果がなく、平均風力係数

の結果だけがあったために構造骨組用設計荷重の計算式を用いているが、これは適切ではなく、外装材用設計風荷重の計算式を用いるべきであろう。

原則として、建設省告示第1458号もJIS C 8955もともに、例示された風力係数とは別に、風洞実験を用いて太陽電池パネルの風力係数を測定する方法を薦めている。ここでは、切妻屋根上に設置される太陽電池パネルの風洞実験結果³⁾を紹介する。ただし、太陽電池パネルの耐風圧試験はその風洞試験の前に行われたので、JIS C 8955よりも安全側の荷重を建設省告示第1458号に基づいて計算し、その結果を耐風圧試験の目標荷重とした。

切妻屋根上に設置される太陽電池パネルの風洞試験では、屋根勾配 $\beta = 10, 20, 24.2, 30$ および 40° の片方(南向き)の屋根に、パネルと屋根表面との間に実スケール30, 90および150mmの隙間を設けて設置された太陽電池パネルの表裏の圧力(パネル裏面の圧力はそのパネルに直面する屋根の圧力と等しいと仮定された)を同時に測定し、両者の変動の差がパネルに作用すると仮定され、平均屋根高さの平均速度圧を基準としたピーク風力係数として表された。1枚当たり約 1m^2 の面積をもつ太陽電池パネル・モジュールの、全モジュール・全風向の中での最大および最小の風力係数を図1に示す。この図によると、屋根勾配が小さいほど、その上に設置される太陽電池パネルの最小ピーク風力係数はクリティカルで、屋根勾配の増大とともに絶対値が小さくなる傾向がある。図1には正と負のピーク風力係数が描かれている。このうち、正のピーク風力係数はパネルを屋根面に押し付ける方向に作用するのに対し、負のピーク風力係数はパネルを屋根から引き剥がす方向に作用するので、太陽電池パネルの耐風設計は負のピーク風力に対してより重要である。図1にはJIS C8955で与えられる平均風力係数にガスト影響係数(地表面粗度区分をIIと仮定した場合に2.2の値)を乗じて換算したピーク風力係数を実線(赤色、青色)で示しているが、これらは実験値の半分ほどの値であり、過小に評価されている。(注：引用文献3)の値は、その後の詳細な検討によって若干変化している。ここでは修正後の値を引用している。)

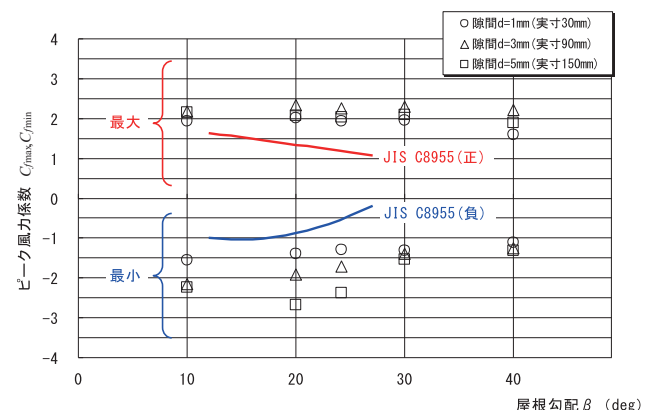


図1 ピーク風力係数と屋根勾配の関係

3. 耐風圧試験で採用した目標荷重

前で述べたように、太陽電池パネルの耐風圧試験の目標荷重は、建設省告示第1458号を用いて設定した。この荷重はJIS C 8955よりも大きい荷重を与え、太陽電池パネルの耐力を安全側に評価できると考えたためであった。建設省告示第1458号に基づくピーク風力係数-2.5の値は、その後に行われた風洞試験での屋根勾配10度の場合の太陽電池パネルのピーク風力係数の値-2.2 (パネルと屋根との隙間が実スケールで90mmであると想定した場合、5章参照)に比較的近い。

一般に耐風圧試験では、試験体を破壊に至らしめるまで荷重を加える場合、必ずしも目標荷重の設定が必要ではないが、設計で期待する値まで荷重を掛けた後、除荷して試験体の残留変形や各部のダメージを調べておくことが望ましい。そのため設計荷重を試験の目標荷重とすることが多いが、建築物を特定せず試験結果を広く設計に用いる場合は、想定する建築物の大きさ、形状、建設場所、周辺の状況や地形によって異なる複数の設計荷重を目標とすることがある。本耐風圧試験では、以下の目標荷重設定の仮定値を用いて、建設場所(地表面粗度区分)が異なる2つの条件の目標荷重を設定した。

- ・地表面粗度区分：Ⅱ,Ⅲ
- ・地域毎の設計用基準平均風速(V_0)：34 m/s
- ・建物高さ(H)：9.7m
- ・屋根勾配：11.6°
- ・ピーク風力係数： $\hat{C}_f = -2.5$
(屋根の形状は切妻屋根とし、屋根一般部のみを設置され端部に使用しないと想定した)

設計風荷重は次式により求められる。

$$W_f = q\hat{C}_f$$

W_f は設計風荷重(N/m²)

q は速度圧(N/m²)

\hat{C}_f はピーク風力係数

以上より、

目標荷重1：地表面粗度区分Ⅲの場合

$$W_f = q\hat{C}_f = 432 \times (-2.5) = -1080 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

目標荷重2：地表面粗度区分Ⅱの場合

$$W_f = q\hat{C}_f = 684 \times (-2.5) = -1709 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

となる。

4. 耐風圧試験

4.1 試験体

試験体は、一般的な仕様の金属製屋根葺き材(嵌合立平葺き)で、その上部に太陽電池パネル(写真2)が再現されている。屋根葺き材は、働き幅330mm、厚さ0.4mmのフッ素樹脂塗装鋼板で、葺き材の片側が留め付けビス(@330mm)で野地板(合板：厚12mm)に固定され、もう一方の端部を隣の葺き材のリブに被せて嵌合することにより固定される。

太陽電池パネルの設置は、屋根葺き材の嵌合部(リブ)に取り付ける固定金物(@660mm×@798mm、以下ファスナーと呼ぶ)に太陽電池パネル設置用フレーム(以下フレームと呼ぶ)を留め付けた後(写真3.4)、パネル留め金具を用いて太陽電池パネルをフレームに固定する方法で行われる。この状態での屋根葺き材と太陽電池パネルのフレーム下端までの隙間は約60mmである。試験体では、図2に示すように2枚の太陽電池パネルを再現している。これは、1枚のパネルの再現では、中央のファスナーに加わる力が2枚のパネルを再現した場合の半分になり、連続で取り付けられるパネル間の固定部の強度が確認されたことにはならないからである。また、太陽電池パネルの四周と試験体枠との間は、太陽電池パネルの受圧時に自由な変形を許すために隙間を設けている(この隙間は後述するようにビニルシートで塞いだ)。このように製作

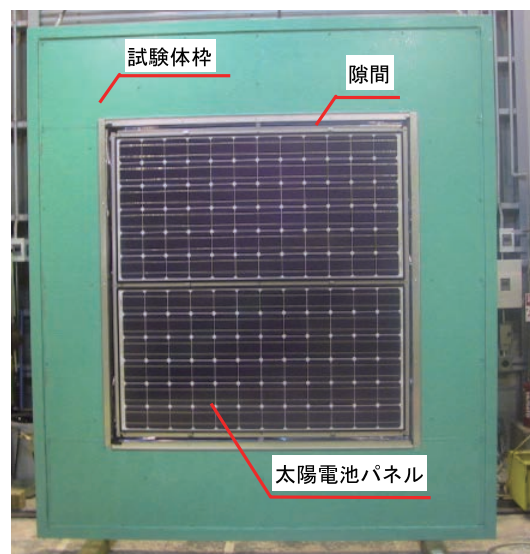


写真2 試験体の外観(屋外側)

された試験体における荷重の伝達経路(ロードパス)は、実際の状況を再現しており、図3に示すように太陽電池パネルに作用する風荷重は、パネル留め金具⇒フレーム⇒ファスナー⇒屋根葺き材嵌合部⇒屋根葺き材固定ビスを介して野地板に伝わり、屋根の構造骨組(ここでは試験体枠に固定された骨組)へと伝達される。

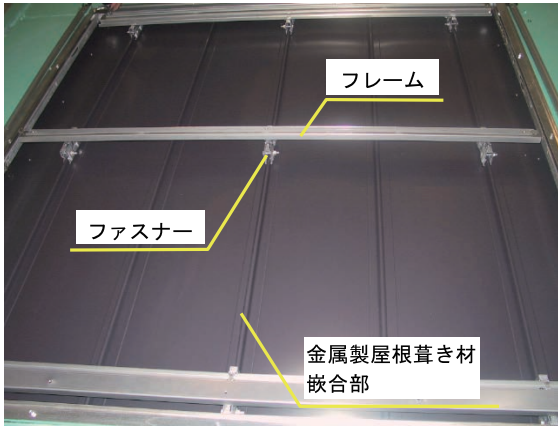


写真3 太陽電池パネル設置前のフレームとファスナー

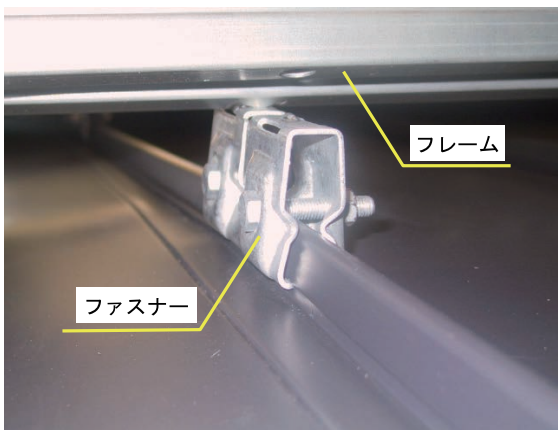


写真4 ファスナーとフレーム

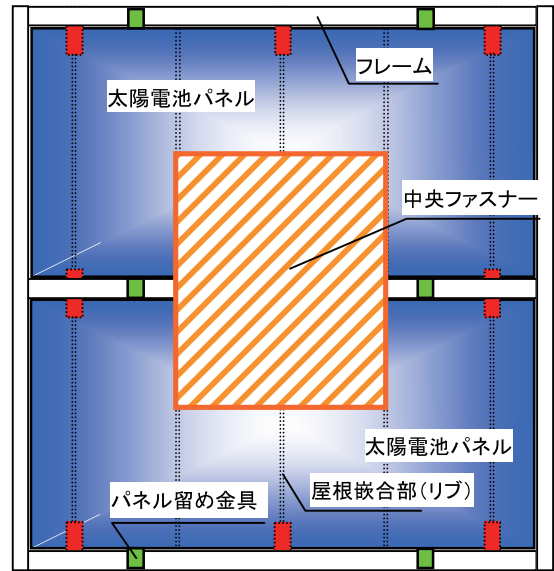


図2 中央のファスナーが負担する受圧面積

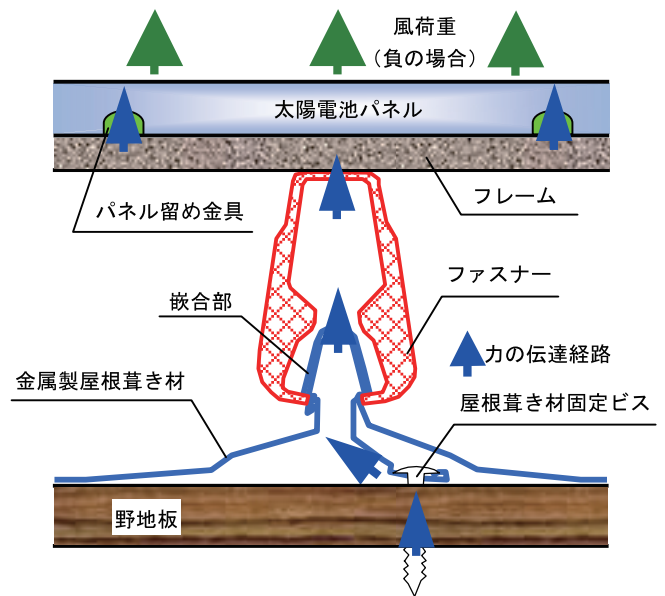


図3 太陽電池パネル～野地板間の力の伝達経路

4.2 試験方法

風洞試験結果(図1)から分かるように、低層建築物の屋根上に設置された太陽電池パネルには正と負の風力(それぞれ、パネルを下に押す方向に作用する力とパネルを上を引き上げる方向に作用する力)が作用する。耐風設計の観点からは、負の風荷重(上向きの荷重)に対してパネルおよび固定部が十分な耐力をもつ(パネルが剥離しない)ことを確認することが重要である。そこで、本耐風圧試験では、負の風荷重のみを対象として行なった(別途、雪荷重を想定した正圧荷重が計画されることもある)。

図4に示すように、試験体を気密に取り付けた圧力箱内の空気を吸引することによって、試験体に負圧(負の荷重)を加えることができる。この試験では、太陽電池パネルのみに負圧がかかるように工夫されて

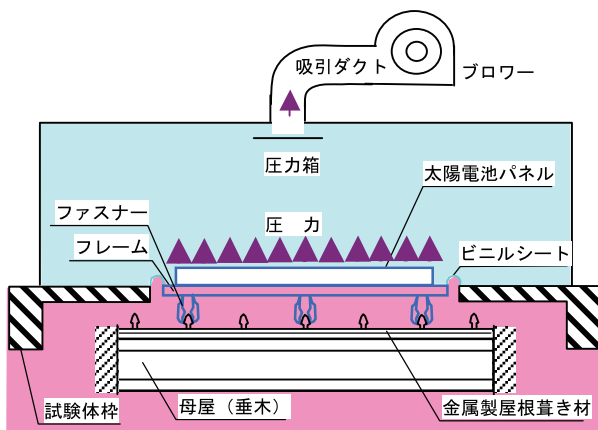


図4 試験体と圧力箱の断面図

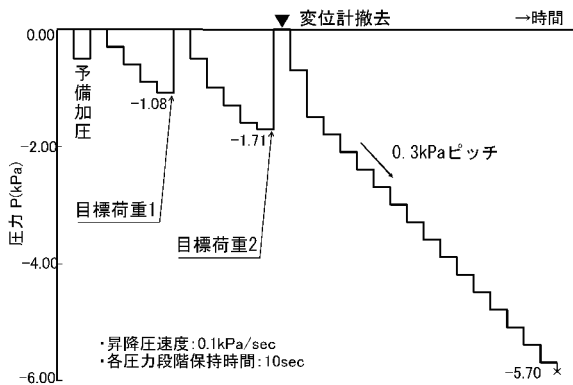


図5 荷重段階

いることに注目していただきたい。パネルと周囲との間には隙間を設け、そこからの漏気を防ぐために薄いビニルシートを張ったので、パネルに作用する圧力がフレキシブルなシートを介して周囲に伝わる(その逆も)量はごくわずかで、大部分はパネルの支持材に伝達される。これにより、パネルからの風力は屋根葺き材のリップを通して野地板に伝えるが、屋根葺き材自体の表面には圧力が加わらない状態としている。

試験体は装置の都合上、鉛直に固定したが、太陽電池パネルの重量は載荷圧力に比べて十分に小さいので、結果への影響も小さい。試験は、図5に示すように、それぞれの目標荷重を段階的に掛けた後、一旦除荷して残留変形を観察し、その後、再び段階的に載荷して試験体の終局強度(すなわち、破壊強度)を確認した。試験体の各部の変形は目標荷重1および目標荷重2まで測定した。目標荷重2の除荷後に残留変位量を測定した後、破損を避けるために変位計を取り外して、以降の載荷段階では変位量の測定は行わず、破壊強度の確認のみを行なった。

4.3 試験結果

圧力と太陽電池パネルのたわみ量の関係を図6に示す。目標荷重2 (-1.71kPa)までの載荷において太陽電池パネルのたわみ量は最大13mmを示したが、パネルの損傷や、脱落等の異常は見られなかった。除荷後における太陽電池パネルの残留たわみ量は小さく、ほぼ元の状態に戻った。また、圧力と太陽電池パネル、野地板間の相対変位量の関係を図7に示す。太陽電池パネルと野地板間の残留変位量は、目標荷重1の除荷後では0.7mm、目標荷重2の除荷後では1.2mmが確認された。その後段階的に載荷し終局強度の確認を行なった。試験体は、荷重-5.70kPa以降の昇圧中に太陽電池パネルに加わった圧力が金属製屋根葺き材の嵌合部に伝わり、屋根葺き材が引張られてビス穴が広がり、葺き材端部が引きちぎられた(写真4)。試験終了後に試験体を解体したところ、太陽電池パネルに損傷は見られなかったが、太陽電池パネル設置用フレームに変形(写真5)が見られた。つまり、この太陽電池パネル・システムの耐風強度は屋根葺き材の接続強度で決定される。

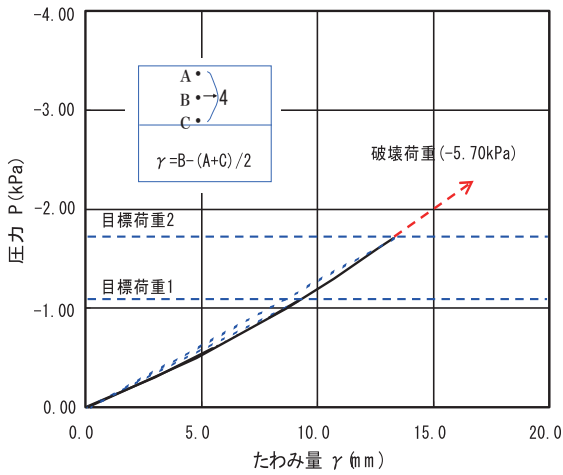


図6 太陽電池パネルのたわみ量

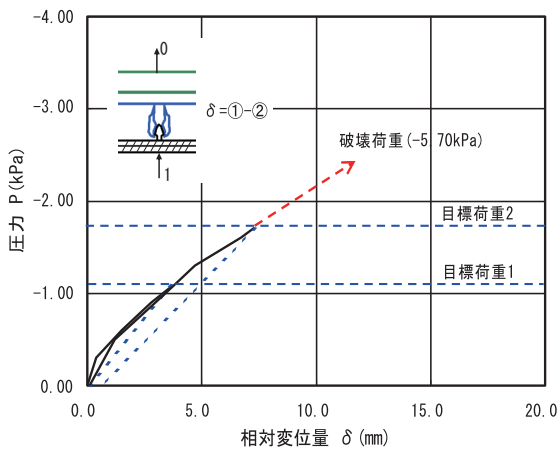


図7 太陽電池パネルと野地板間の相対変位量

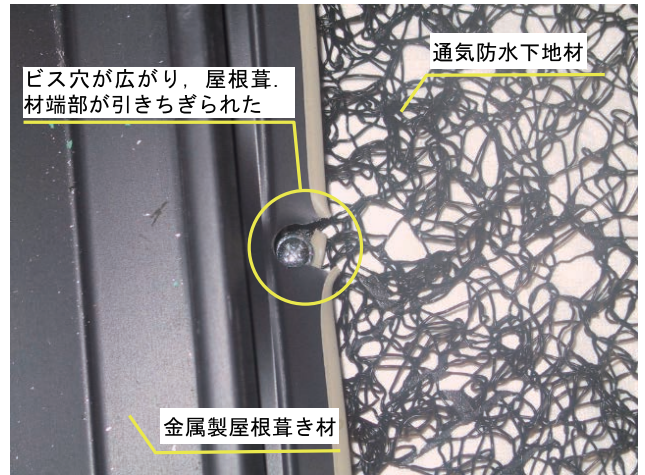


写真4 ビス固定部で金属製屋根葺き材が引きちぎられた状況

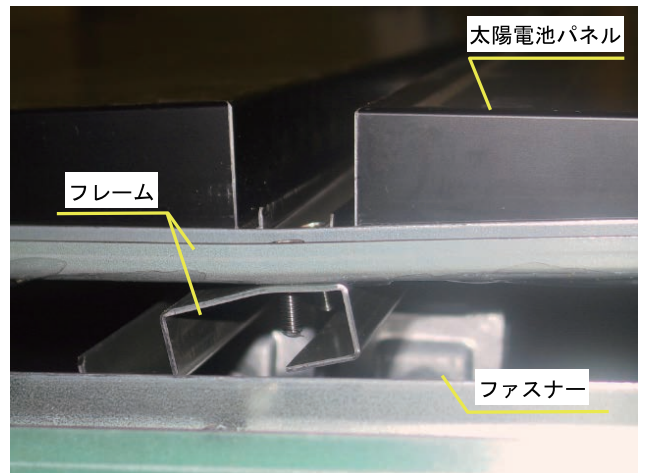


写真5 太陽電池パネル設置フレームの変形状況

5. 耐風圧試験結果の応用

耐風圧試験結果から、当太陽電池パネルが、目標荷重をクリアし、目立った残留変形もなく、目標荷重の3倍を超える終局耐力を有することが分かった。これより、この太陽電池パネルは十分な余耐力をもって目標荷重以下の設計荷重が要求される場所で用いることができる。しかしこの太陽電池パネルは、最初に設定した荷重よりも十分大きい荷重まで耐えることができたので、この試験結果をさらに高い設計荷重にまで適用することを検討する。

ある荷重を受ける部材がその荷重に対して安全であることを検証する一般的な方法は、(許容耐力) \geq (荷重)であることを示すことである。これは、最も容易で明確な方法であることから、広く採用されており、許容耐力法と呼ばれる。実際には耐力と荷重はともばらつきを持ち、確率的に表現する方法、つまり信頼性設計法の採用が望ましいが、それはばらつきを表すための多くの情報や労力が必要となるため、両者を確定的に表す許容耐力法が採用されることが多い。

許容耐力は終局耐力を安全率で除した値で、一般の工学では1.5～2.0の安全率を採用することが多

い。ここでは、太陽電池パネルの終局耐力が -5.7 kN/m^2 であったことから、安全率を2.0と設定して、 $-5.7/2.0 = -2.85 \text{ kN/m}^2$ を新しい許容耐力とする。この場合、 -2.85 kN/m^2 載荷後の残留変形量は確認していないが、図7の荷重変形曲線は、ほぼ直線状に延びていることから、新しい許容耐力付近の荷重範囲では、太陽電池パネルはほぼ弾性的な挙動を示すものと思われる。

一方、荷重は、風洞試験で得られた太陽電池パネルのピーク風力係数に、設計風速から導かれる速度圧を乗じて設定できる。太陽電池パネルのピーク風力係数 \hat{C}_f はパネルと屋根間の隙間 l によって変化し、ここでは、図1の屋根勾配 10° のケースから得られる $l=90\text{mm}$ の時の $\hat{C}_f = -2.2$ の値とした。文献3の風洞試験は、平成12年建設省告示第1458号の計算方法を用いて太陽電池パネルに作用する風荷重を設定することが意図されていたので、示されたピーク風力係数から設計風荷重を直接計算することができる。風荷重の算定に要求される情報は、ピーク風力係数以外に、建設サイトの位置と太陽電池パネルが設置される建築物の大きさや形状であり、これらは、基準設計風速、地表粗度区分、建築物の幅、奥行き、高さおよび屋根の

形状と屋根勾配の値に具体化される。試験された太陽電池パネルが使用されると想定した条件(屋根勾配 10° の切妻屋根、パネルと屋根間の隙間 90mm)の他に残されたパラメータを変化させて、つまり種々の基準風速($V_0=30\sim 46\text{m/s}$)と地表面粗度区分(IIとIII)を変化させ、建築物の高さを $H=15\text{m}$ と設定して得られる太陽電池パネルの設計風荷重と前述の許容耐力との比較を表1と図8に示す。これらの表と図は、安全率を2.0と設定した太陽電池パネルの許容耐力が、所与の条件で得られる風荷重を上回り、安全に使用できる範囲を黄色の領域で示している。なお、図8に示した設計範囲は、太陽電池パネルの風力係数が得られた風洞試験結果の適用範囲に限定されることを述べておかなければならない。つまりここでは、太陽電池パネルは、屋根の端部から内側に距離を置いて(例えば、 30cm 程度)設置され、住宅や小規模商業建築物のような低層建築物の上に設置される場合のみを想定している。また、ここでは地表面粗度区分がIの場合や建築物の高さが 15m を超える場合の荷重計算は省略したが、設計者においては太陽電池パネルの具体的な設置案件のパラメータを代入して、建設省告示第1458号に基づいた荷重計算を行っていただきたい。

基準風速 $V_0(\text{m/s})$	設計風荷重 W (kN/m^2)	
	粗度区分II	粗度区分III
30	-1.33	-0.88
32	-1.52	-1.00
34	-1.71	-1.13
36	-1.92	-1.27
38	-2.14	-1.41
40	-2.37	-1.57
42	-2.62	-1.73
44	-2.87	-1.89
46	-3.14	-2.07

■ 部は安全率を2.0と仮定して考慮した許容耐力が設計荷重以上であることを示す。

表1 太陽電池パネルの設計風荷重 ($H=15\text{m}$ の場合)

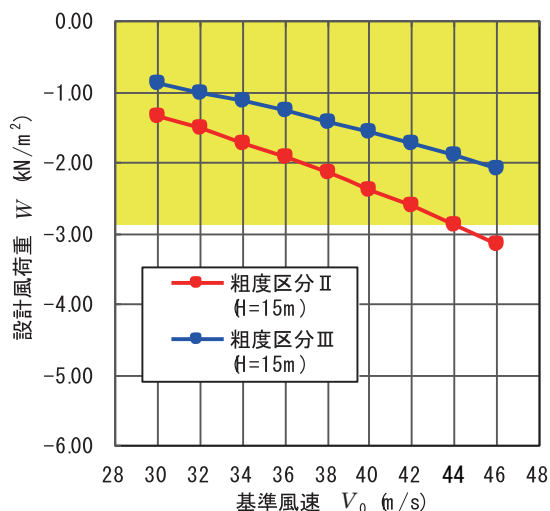


図8 本試験体の許容耐力と設計風荷重の比較

6. まとめ

太陽電池パネルの設置が急速に広まるなか、これまで適切な耐風設計および耐風圧性能の評価がなされたケースは少ない。本稿では、最新の研究成果に基づく太陽電池パネルの設計風荷重の設定と、その設計風荷重を目標荷重とした太陽電池パネルの耐風圧性能試験の結果について報告した。耐風圧性能試験では、太陽電池パネルに風荷重が加わった場合の力の伝達経路が適切に再現された金属製屋根葺き材を含む試験体を用い、載荷時における試験体各部の変形状、目標荷重載荷後の残留変位および破壊強度を確認した。その結果、金属屋根の上に固定された太陽電池パネルは目標荷重の載荷後においても有害な変形等は認められず、また、終局耐力は目標荷重の3倍を超えることが確認された。その結果を踏まえ、安全率を2.0に変更して、当太陽電池パネル・システムの適用範囲を基準風速と粗度区分の変化の組み合わせで与えた。

謝辞

本試験は、株式会社島屋の依頼により実施した。本稿への転載の許可を頂いた同社に感謝します。

参考文献

- 1) 西村元吾、中川尚大、高森浩治、西村宏昭：切妻屋根に設置される太陽電池パネルの風荷重（その1）実験概要と平均風圧、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、構造I（B-1）、PP165-166、2010年9月
- 2) 中川尚大、高森浩治、西村宏昭、西村元吾：切妻屋根に設置される太陽電池パネルの風荷重（その2）ピーク風力係数、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、構造I（B-1）、PP167-168、2010年9月
- 3) 高森浩治、中川尚大、山本学、吉田昭仁、奥田泰雄、中村修：（特集）設計者のための風力係数の充実：低層住宅に設置される太陽光発電パネルのピーク風力係数、日本風工学会誌、2011年10月

