

太陽光発電設備の風洞実験と数値流体解析

Wind Tunnel Tests and Computational Fluid Dynamics on Photovoltaic Systems

高森浩治*

1. はじめに

太陽光発電設備（PV 設備）は強風による被害が比較的多く発生しており¹⁾、その構造安全性を確保するためには耐風設計が重要である。PV 設備をはじめとする構造物の耐風設計においては適切な風荷重の設定が不可欠であり、風荷重は構造物の形状や構造物周辺の地形や地物（地表面粗度）の状況によって異なるため、専門的な知識が必要となる場合が多い。また、構造物が特殊な環境に設置される場合や一般的な形状でない場合には、風洞実験や CFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）解析を行い、その結果をもとに設計風速や設計用風力係数の設定が必要となる。

本報では、耐風設計における風洞実験および CFD 解析の目的や基本事項を解説したうえで、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術研究開発機構）の委託研究で実施した PV 設備に関する風洞実験および CFD 解析の実施事例を紹介する。

2. 耐風設計における風洞実験および CFD 解析

2.1 風洞実験および CFD 解析の目的

PV 設備の耐風設計を行う際に実施される風洞実験や CFD 解析は、対象の PV 設備に作用する風による外力（風圧や風力）を求めることを目的として実施され、PV 設備の耐風性能（強度）を直接的に評価することはほとんどない。これは、実物の PV 設備を設置できるような大きさの風洞装置がほとんどないことや、CFD 解析においては PV 設備に作用する風外力と PV 設備の各部材の強度計算を同時計算できるような解析技術が確立されていないためである。通常、PV 設備の風洞実験では縮小模型を風洞内に設置し、風を吹かせて模型上での現象を捉

えることになるので、そこで得られる物理量（風速、風圧、風力など）は無次元量（比や係数など）で整理される。他方、CFD 解析においても風洞実験と同様のことをコンピュータ内で行っている。なお、耐風設計においては風洞実験等で得られた無次元量をもとに実物の物理量（風速、風圧、風力など）に変換して用いられる。

2.2 風洞実験での相似則

PV 設備での風洞実験では縮小模型が用いられるため実物と模型での相似則を考える必要があり、実物（実際の現象）と模型（実験での現象）での無次元量を等しくするという考え方が基本となる。例えば、実物と模型を相似形にすることは、その形状の寸法比（幅と高さの比など）を等しくすることに他ならない。同様に、風洞気流（模型に当たる風）についても自然風を模擬した気流を再現する必要がある。また、風洞実験で測定された風速、風圧、風力などは、風洞内の代表点における風速や速度圧で無次元化し、風速比、風圧係数、風力係数などの値として整理される。

・風速比 R ：
$$R = V_i / V_{ref}$$

V_i ：対象物周辺の測定点における風速（m/s）

V_{ref} ：接近風の代表点における風速（m/s）

・風圧係数 C_p ：
$$C_p = P_i / P_{ref}$$

P_i ：対象物表面に設定された測定点での風圧（Pa）

P_{ref} ：接近風の代表点における速度圧（Pa）

・風力係数 C_F ：
$$C_F = F / (P_{ref} \cdot A)$$

F ：対象物に作用する風力（N）

P_{ref} ：接近風の代表点における速度圧（Pa = N/m²）

A ：対象物の代表面積（m²）

* 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）

‡ e-mail: k_takamori@spei.or.jp

風洞実験やCFD解析で得られた風速比 R 、風圧係数 C_p 、風力係数 C_F は、実物にも適用できることから、これらの無次元量と実物における接近風の風速、速度圧および代表面積等を用いて、実物での風速、風圧、風力を算出し、それらの結果をもとに設計風速や設計用風荷重を設定する。

2.3 風圧と風力

物体に作用する風外力として、「風圧」、「風力」、「風圧力」という用語が広く用いられているが、これらを混同して使われている場合が散見されるため、ここでは、次のように定義する。

- ・風圧：風の流によって生じる物体表面の圧力。単位は Pa。圧力はその点においては方向によらず一定に作用するが、物体表面に着目するとその面に対しては法線方向（垂直）に作用する。このとき、表面を押し方向の圧力を「正圧」、引く方向の圧力を「負圧」と呼ぶ。
- ・風力：物体表面の風圧を物体全体または部分的に積分した力。単位は N。物体の構造軸(x,y,z軸)に分解して表現することもある。風力と風圧力は同義で扱われる場合が多い。

図1にPVモジュールに作用する風圧と風力のイメージを示す。厳密にはPVモジュールの側面にも風圧が作用するが、ここでは無視して表現している。前節に示した風圧係数や風力係数はこれらの風圧や風力を無次元化したものである。

3. PV設備を対象とした風洞実験およびCFD解析の事例

一般的な設置形態におけるPV設備の風荷重はJIS C 8955 : 2017²⁾によって算出することができるが、PV設備の設置形態は多様化が進み、傾斜地、農地、水上にも設置される場合が増加している。そこで、NEDOの委託研究において、多様な設置形

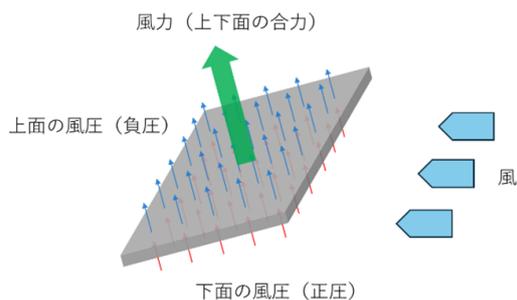


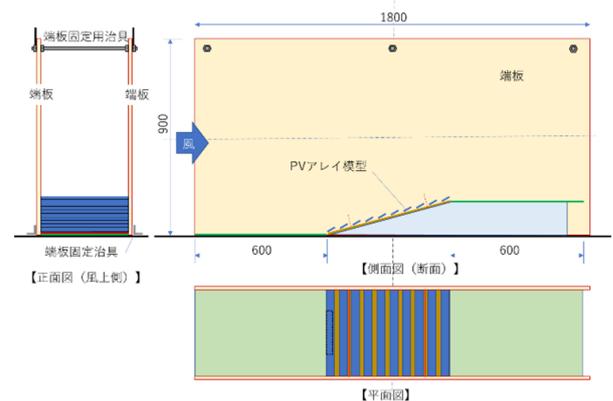
図1 PVモジュールに作用する風圧と風力のイメージ

態の耐風設計に対応すべく風洞実験やCFD解析を実施した。以下にその結果の一部を紹介する。

3.1 傾斜地に設置されるPV設備の風洞実験

傾斜地に設置されるPV設備の風力は、平地に設置された場合と異なることが想定されたため、その性状を把握するために風洞実験を実施した。図2は風洞実験を行った縮小模型（縮尺1/100）の概要である。風洞の閉塞率の制約^{*1}から2次元模型実験（風の流れを2次元に制限する実験）としているが、実験気流は自然風を模擬した乱流としている。アレイの風力係数は、アレイ模型の上面と下面に設けられた風圧測定孔（図2(c)参照）に作用する風圧の測定結果からアレイ上下面の差圧より風力を求め、接近風の速度圧とアレイの面積で基準化して算出している。測定ケースは、地盤やアレイ面の傾斜角を変化させた21ケースとした。

図3はPVアレイの風力係数の測定結果の一例である。図中に示す等価風力係数 C_{te} は、JIS C 8955 : 2017²⁾での風力係数の定義に合わせたもの（ピーク風力係数をガスト影響係数で除した値）である。図3の(a)に示すように、法肩（傾斜地の上端）付近に設置されたPVアレイの正（アレイを下方向に押す方向）の風力係数は、JIS C 8955の規定値を大きく上回る。その要因は傾斜地による風速増加であると考えられ、風力係数の増加率は風速増加率の2



(a) 模型概略図



(b) 模型の全景（風上側より）

(c) 風圧測定孔

図2 傾斜地に設置されるPV設備の風洞実験

乗（速度圧の増加率）に概ね等しい値であった。一方、図3の(b)に示すようなPVアレイが風を孕むような角度で設置した場合には、法尻（傾斜地の下端）付近のアレイで負の風力係数がJISの規定値を大幅に下回る（絶対値が大きくなる）。法尻付近では風速増加は確認されなかったが、アレイ上面の強い負圧の発生が負の風力係数の絶対値が大きくなる要因であった。他の測定ケースにおいても、法尻や法尻付近に設置されたアレイの風力係数はJISの規定値を超過する傾向にあったことから、法尻や法尻付近に設置されるアレイは設計用風荷重の割増しを考慮する必要があることが分かった。特に法尻に設置されるアレイでは、風速増加のない位置においても風荷重が増加することに注意する必要がある。

※1：風洞の測定部断面内に模型などを設置した場合、それによる風洞断面を閉塞する面積を5%程度までにする必要があるとしている。

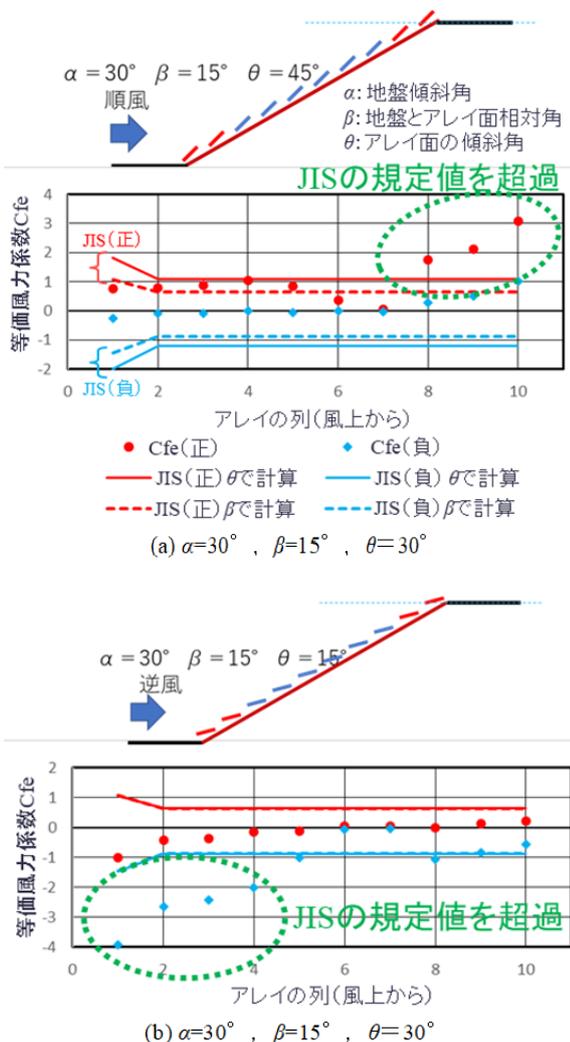


図3 傾斜地に設置されたPVアレイの風力係数

3.2 傾斜地での風速増加に関するCFD解析

(1) 解析手法による比較

傾斜地での風速増加について風洞実験を行う場合、風洞の閉塞率の制限でCFD解析を用いることが想定されるが、解析の手法や条件設定によって、その結果が大きく異なる場合がある。CFD解析の手法としては、RNAS^{**2}やLES^{**3}が広く用いられていることから、ここでは傾斜地での風速分布を対象として、それらの解析手法を用いた場合の結果の差異について確認した。

解析対象とした傾斜地は7.5, 15, 30°の傾斜角をもつ単調な登り勾配の傾斜地とした。図4はRANSとLESの解析モデルである。解析メッシュはいずれも構造格子であるが、解析時間の関係上、RANSが336万メッシュ、LESが30万メッシュとしている。流入風は地表面粗度区分Ⅱに相当する境界層乱流（べき指数約1/7のべき乗則）とした。

図5は傾斜角15度の傾斜地についてのRANSとLESの解析結果を比較した例であり、各地点での風速は風速の割増し係数（平坦地での風速に対する傾斜地での風速の比）として表している。同図には建築物荷重指針³⁾の風速の割増し係数 E_g の規定値も示しており、この値は風洞実験の結果をもとに設定されたものである。この結果によれば、RANSとLESの解析結果には大きい差が見られる。特に法尻（ $x/H = 0$ ）から風下側では地表面近くでRANSの結果のほうが小さいことが分かる。一方、LESは荷重指針の規定値に近く風洞実験結果との良い対応を示すことが分かった。PV設備の耐風設計においては地表面付近の風速の予測が重要であるため、RANSによる解析結果を用いた場合には設計風速を過少に評価する可能性があることに注意が必要である。

※2 RANS：Reynolds-averaged Navier-Stokes equationの略称。ナビエ-ストークス方程式をアンサンブル平均して解く手法。乱流の影響は乱流モデルとして空間的・時間的に平均化するので、乱流の非定常な流れについては対象としない。長所は計算負荷が小さい。短所は非定常な流れ場には不向き。

※3 LES：Large Eddy Simulationの略称。ナビエ-ストークス方程式を空間的に平均化する手法で、計算メッシュより小さい渦は乱流モデルで表現し、メッシュより大きい渦は直接計算される。そのため、変動する流れについても解析が可能である。長所は非定常な流れ場も解析可能。短所は計算負荷が大きい。

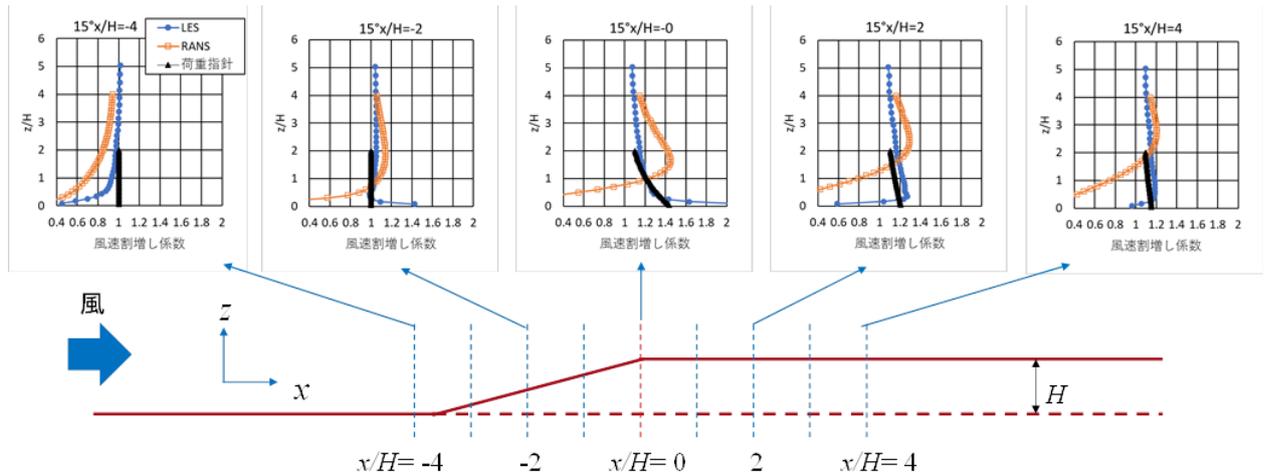


図5 傾斜地の風速割増し係数の比較（地盤傾斜角 15°）

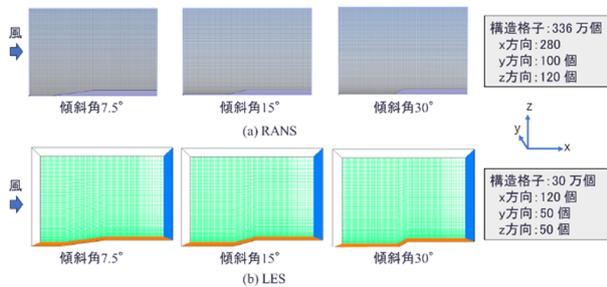


図4 RANS および LES の解析モデル



図6 強風被害があった傾斜地 PV 発電所

(2) 実在地形の CFD 解析による風速分布の推定

強風被害のあった傾斜地 PV 発電所周辺の実在地形を対象に LES による CFD 解析を行い被害場所と風速分布の関係を調査した（図6 参照）。また、ここでの検討結果をもとに傾斜地を含む地形における CFD 解析の方法とその注意点等をまとめた。

対象発電所での気流を適切に再現するためには、その近辺の地形の再現だけでは不十分な場合が多いため、本解析では図7に示すように大領域（6km × 6km）の解析で大きな流れを計算し、その結果を小

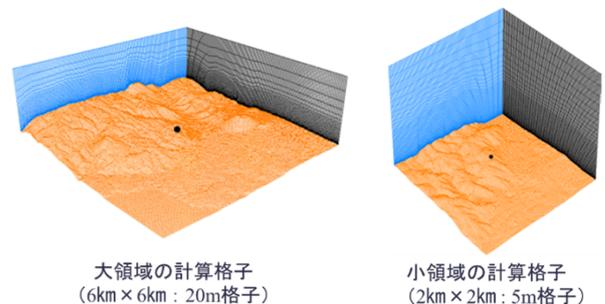
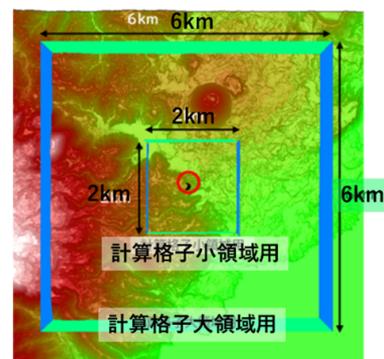


図7 計算領域と計算格子

領域（2km × 2km）への流入風として入力して小領域内の解析精度を向上させている。また、地表面近くの気流は樹木等の影響を大きく受けるため、CFD 解析を行う際にはそれらの再現も重要であり、樹木による風の流れへの影響については植物キャノピーモデルを用いた⁴⁾。植物キャノピーモデルにおいては、発電所周辺の植生と樹種ごとの葉面積密度と葉の抗力（風方向の風力）のパラメータを与える必要があり、それらについては現地調査の結果をもとに設定している（図8 参照）。

図9は発電所周辺の風速の LES による解析結果であり、キャノピーモデルの有無による比較を行っている。キャノピーモデルを用いた場合の解析結果

は、風速増加が見られた場所がPV設備の被害発生場所と一致していた。一方、キャノピーモデルを用いていない解析結果では、広範囲で風速増加の領域が見られ、被害発生場所との対応が良くないことが分かる。

このように、地形による風速増加を適切に評価するためにはLESによる解析、解析エリアの設定、キャノピーモデルの使用など、高度な専門知識を要するので、簡易な方法でのCFD解析は推奨できない。近年、コンピュータの性能の向上に伴いCFD解析が比較的容易にできるようになってきたが、構

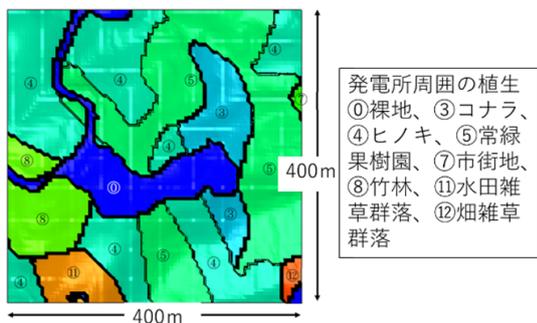
造安全性に直接関係するCFD解析の実施にあたってはCFD解析に精通した専門家に依頼する必要がある。

3.3 営農型PV設備の風洞実験

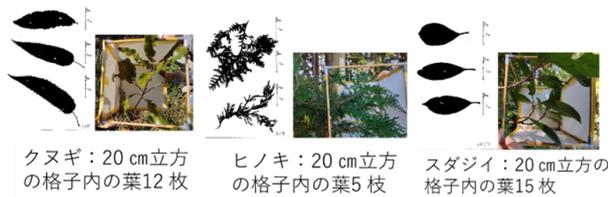
農地に設置されるPV設備は、アレイ下部での農作業の空間を確保するため、架台の背が高く、支柱の間隔が広い特徴がある。また、国内においては図10のような藤棚式と呼ばれる形式の架台を用いたPV設備が広く普及している。この藤棚式架台は一般的な地上設置型PV設備とはアレイ（モジュール）の配置が異なるため、風圧荷重を求めるための風力係数は風洞実験によって設定する必要がある。ここではその実験事例を紹介する。

想定した藤棚式架台は、梁の高さが3.0m、柱の間隔は東西方向4.0m×南北方向4.6mとし、それぞれ5スパン分を再現している。測定ケースは、遮光率（アレイ下部の農地への太陽光を遮る割合であり、アレイの外郭平面積に対するPVモジュールの平面積が占める割合で表す）とアレイ（モジュール）の傾斜角を変化させた4ケースを基本とした。遮光率35%のケースについては、アレイ下部農地に農作物がある条件についても測定したが、農作物があることによってアレイ面の風力係数を増大させることはなかった。風洞実験の条件は次のとおりである。

- ・実験模型の縮尺：1/50（図11参照）
- ・遮光率 β ：35%、70%
- ・アレイの傾斜角 θ ：10°、30°
- ・農作物の再現：高さ50cm相当（遮光率35%のみ）



(a) 発電所周辺の植生



(b) 樹種ごとの葉面積密度

図8 発電所周辺の樹木の種類と葉面積密度

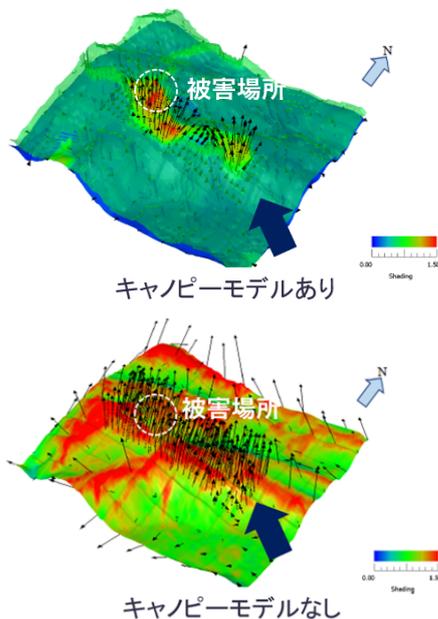


図9 実在地形のLESによる解析結果

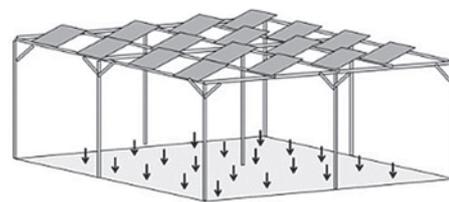


図10 藤棚式架台の営農型PV設備

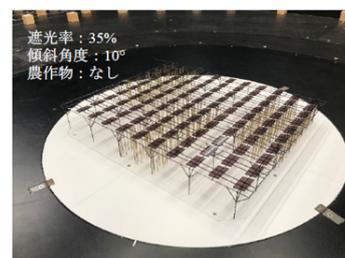
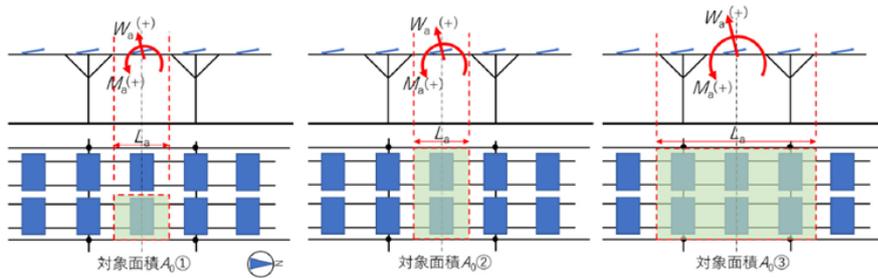


図11 実験模型の例 ($\beta = 35\%$, $\theta = 10^\circ$, 農作物なし)



$$W_a = C_a \cdot q_p \cdot A_0 \cdot \beta$$

$$M_a = C_{Ma} \cdot q_p \cdot A_0 \cdot \beta \cdot L_a$$

W_a : アレイ面の風圧荷重 (N)
 M_a : アレイ面のモーメント (Nm)
 C_a : アレイ面の風力係数
 C_{Ma} : アレイ面のモーメント係数
 q_p : 設計速圧 (Pa)
 A_0 : アレイの外郭面積 (m²)
 β : 遮光率
 L_a : アレイのモーメント距離 (m)

図12 風圧荷重と風力係数の定義

表1 藤棚式営農型PVアレイの設計用風力係数

アレイの角度θ(度)	10	10	30	30	10	10	30	30	
遮光率β(%)	35	70	35	70	35	70	35	70	
C_a	対象面積 A_0 (m ²)	端部アレイ：順風(正圧)				端部アレイ：逆風(負圧)			
	①3.5	2.2		3.2	-2.5	-3.4	-2.9		
	②7.0	2.0		3.1	-2.3	-3.2	-2.7		
C_{Ma}	①3.5	1.3	1.1	1.9	1.3	-1.4	-1.2	-2.0	-1.5
	②7.0		0.20		0.30	0.25	0.40	0.25	0.40
	③25.6		0.20		0.30	0.20	0.35	0.20	0.35
C_a	対象面積 A_0 (m ²)	中央部アレイ：順風(正圧)				中央部アレイ：逆風(負圧)			
	①3.5	1.7	1.3	2.3	1.5	-1.7	-1.3	-2.3	-1.8
	②7.0	1.5	1.2	2.0	1.3	-1.5	-1.3	-2.2	-1.7
C_{Ma}	①3.5	0.8	0.6	1.3	0.7	-1.0	-0.7	-1.6	-1.2
	②7.0	0.10	0.20	0.10	0.20		0.20		0.30
	③25.6		0.10		0.20	0.15		0.10	0.20

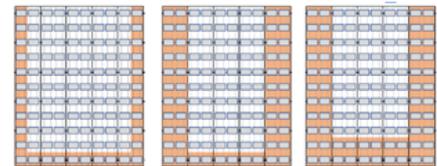
備考：対象面積①～③はそれぞれ次の面積を想定している。

①：2m×1.2m=2.4m² (β=70%) ~ 2m×2.3m=4.6m² (β=35%) ⇒3.5m² (中央値)

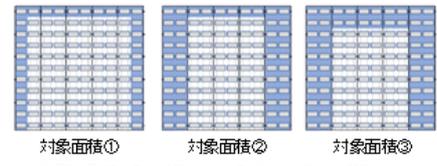
②：4m×1.2m=4.8m² (β=70%) ~ 4m×2.3m=9.2m² (β=35%) ⇒7.0m² (中央値)

③：4m×5.8m=23.2m² (β=70%) ~ 4m×7m=28m² (β=35%) ⇒25.6m² (中央値)

アレイの角度が10~30度、遮光率が35~70%、対象面積 A_0 が3.5~25.6m² の範囲内にある場合には、それぞれについて直線補完した値を用いることができる。



対象面積① 対象面積② 対象面積③
順風(正圧)での端部アレイの領域(色塗り部)



対象面積① 対象面積② 対象面積③
逆風(負圧)での端部アレイの領域(色塗り部)

- ・測定風向 : 5° 間隔 72 風向
- ・実験気流 : 地表面粗度区分 II 相当の境界層乱流

アレイの風力係数は、アレイ模型の上面と下面に設けられた風圧測定孔に作用する風圧の測定結果からアレイ上下面の差圧より風力を求め、接近風の速度圧とアレイの面積で基準化して求めている。藤棚式の架台は、多スパン構造(多数の支柱が梁で連結された構造)であり、太陽電池モジュールが疎らに配置されるため、①モジュール、②梁、③支柱を想定した風荷重が設定できるように、それぞれの対象面積に対応した風力係数を求めた。また、アレイ面の法線方向の風力だけでなく、部材の捩じりモーメントや支柱の軸力分担を検討するためのモーメント係数も与えている(図12参照)。

表1は風洞実験結果をもとに提案した藤棚式架台の設計用風力係数であり、前述の対象面積別にアレイ面の風力係数 C_a とモーメント係数 C_{Ma} を示している。このモーメント係数 C_{Ma} は、JIS C 8955:2017には示されていない係数であるが、架台の部材や基礎の設計においてアレイに作用するモーメントを考慮することで安全かつ合理的な設計が可能であるので、活用していただきたい。

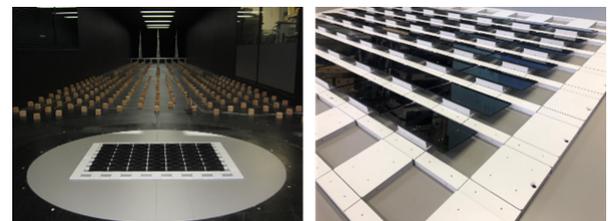


図13 水上設置型PV設備の風洞実験の様子

3.4 その他のPV設備の風洞実験

前述してきたPV設備のほかに、水上設置型PV設備の風洞実験(図13)も実施しているが、紙幅の関係上割愛した。その結果はNEDOのWebページで公開されているので、参照していただきたい⁵⁾。

4. まとめ

PV設備は軽量かつ構造強度の冗長性が低いため、強風によって損壊、飛散する被害が少なからず発生している。耐風設計を確実にを行うためには設計風速や設計用風力係数を適切に設定することが重要であるが、それらに関する技術資料は十分に整備されていなかった。この課題を解決するためにNEDOの委託研究において様々な設置形態のPV設備の設計・施工ガイドラインの策定を進めている。その過程で

各種実証実験を行っており、本報ではその一部の成果としてPV設備の風洞実験やCFD解析の結果を紹介した。これらの成果がPV設備の耐風安全性向上に寄与することを期待したい。

参考文献

- 1) 高森浩治, 伊藤隼人: 強風被害にみる太陽電池発電設備の構造的弱点, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造I, pp.213-214, 2018
- 2) 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
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 2015年版, pp.22-24, (2015)
- 4) 例えば, 平岡久司: 植物を有する流れ場のLESモデルの作成, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻第639号, 603-612, 2009年5月
- 5) NEDO: 水上設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2023年版, 技術資料: 水上

設置型太陽光発電設備の風洞実験, 2023,
<https://www.nedo.go.jp/content/100960295.pdf>

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。

著者略歴



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。