特 集

多様化する太陽光発電システムの耐風設計上の課題

営農型 PV の実情と耐風設計上の課題

Current Status and Issues of the Wind Resistant Design for the Farming PV Systems

相原知子^{*1}

染川大輔^{*2}

大竹和夫^{*3}

高森浩治^{*4}

Tomoko AIHARA

Daisuke SOMEKAWA

Kazuo OHTAKE

Koji TAKAMORI

1. はじめに

2012年にFIT制度(固定価格買取制度)が開始されたことにより、農業の経営(営農)を行いながら農地の上部空間に太陽光発電システム(PVS)を設置し、太陽光を農業と発電とで共有する営農型PVSの導入が進んでいる。営農型PVSの一例を写真1に示す。営農型PVSは農地を利用するため、農林水産省の管轄であり、HPにて「営

農型太陽光発電について」¹⁾や「営農型太陽光発電取組支援ガイドブック」²⁾などを公開している。

営農型PVSの設置には、農地法に基づく一時転用の許可が必要であり、PVSの支柱の基礎部分についても一時転用許可の対象となる。文献1)によれば、営農型PVSを設置するための農地転用許可の実績は、2017年度までに1,905件(再許可を含む)に上る。2018年5月に農地転用

写真1 営農型PVSの一例(引用元:構造耐力評価機構撮影)

*1 大成建設株式会社 技術センター 都市基盤技術研究部 tomoko.aihara@sakura.taisei.co.jp

Urban Engineering Research Department, Technology Center, TAISEI CORPORATION

*2 株式会社大林組 技術研究所 都市環境技術研究部

Urban Environmental Engineering Department, Technical Research Inst. Obayashi Corp.

*3 株式会社竹中工務店 技術研究所 自然・生態環境部

Natural & Biological Environmental Engineering Department, Research Development Institute, Takenaka Corporation

*4 構造耐力評価機構 理事

Director, Structural Performance Evaluation Institute

許可の取り扱いが見直され、担い手が自ら所有する農地を利用する場合や荒廃農地（荒廃農地の発生・解消状況に関する調査要領（平成 20 年 4 月 15 日付け 19 農振第 2125 号農林水産省農村振興局長通知）の 2 に規定する荒廃農地）を再生利用する場合等において、一時転用許可期間が 3 年以内から 10 年以内に延長されたことから、更なる導入の増加が予想される。

「支柱を立てて営農を継続する太陽光発電設備等についての農地転用許可制度の取り扱いについて（30 農振第 78 号農林水産省農村振興局長通知）」では、“簡易な構造で容易に撤去できる支柱として、申請に係る面積が必要最低限で適正と認められること”，“支柱の高さについては、当該農地の良好な営農条件が維持されるよう、効率的な農業機械等の利用が可能な高さ（農業機械による作業を必要としない場合であっても、農業者が立って農作業を行うことができる高さ（最低地上高おおむね 2 メートル以上））を確保していると認められること”，“下部の農地における営農が行われない場合又は営農型発電設備による発電事業が廃止される場合には、支柱を含む当該設備を速やかに撤去し、農地として利用することができる状態に回復すること”等が条件として示されている。

上述したように、営農型 PVS では農作物の品質や収穫量および作業性を確保するため、一般的な地上設置型 PVS とは PV モジュールの寸法、配置間隔、柱の高さやスパン長等が異なり、遮光率は低く、柱は高く、スパンは長くなる傾向にある。また、基礎は水田や畑など様々な地質において強度を発揮し、かつ容易に撤去できるものとしなければならないため、耐風設計が困難である。

そこで本稿では、営農型 PVS の強風による被害事例の紹介と耐風設計に関する考え方を述べる。

2. 被害事例の紹介

2019 年 9 月 5 日に発生した台風 15 号は、9 月 9 日に関東地方に上陸し、千葉県を中心に甚大な被害を及ぼした。この台風により被害を受けた営農型 PVS の事例を写真 2 に示す。写真 2(a) は PVS の東側端部の状況であり、架台の破損とモジュールの飛散がみられる。写真 2(b) に示すように部材接合部（継手）が破損したことにより架台の倒壊や変形が発生し、押え金具で固定されていた PV モジュールが外れて飛散したものと推定される。写真 2(c) は、柱上部と梁の接合部が外れた状況である。アルミ製架台の部材間接合部には、施工性の観点から T 溝とスロットによる接合が広く用いられているが、溝方向に力が作用する構造になっているために接合部が外れる事例が少な

(a) 端部での架台の破損とモジュールの飛散

(b) 部材接合部での破損

(c) 柱梁接合部材の脱落

(d) 柱部材の折損

写真 2 強風被害事例

(引用元：構造耐力評価機構撮影)

からず発生している。写真 2(d)は柱部材が中央部で折損した事例である。アルミ部材は、熱処理によって強度を向上させることができるが、部材が脆性的な破壊をする場合がある。

3. 耐風設計の考え方

3. 1 風荷重の算定方法

構造骨組用（アレイの支持物設計用）風荷重 $W_s(N)$ および外装材用（モジュール設計用）風荷重 $W_c(N)$ は、次式で求めることができる³⁾。

$$W_s = q_H \cdot G_f \cdot C_f \cdot A \quad (1)$$

$$W_c = q_H \cdot \hat{C}_f \cdot A \quad (2)$$

ここで、

q_H ：代表高さ H における平均速度圧 (N/m^2)

G_f ：ガスト影響係数

C_f ：アレイ支持物設計用風力係数

$\hat{C}_f$ ：モジュール設計用ピーク風力係数

A ：受風面積 (m^2)

なお、JISC 8955：2017⁴⁾に示されている風力係数は、風洞実験で得られたアレイのピーク風力係数を JIS C 8955 のガスト影響係数で除した値である。

3. 2 風洞実験の事例紹介

3.1 節に示したように、風荷重の算定には、風力係数が

必要であるが、営農型 PV の風力係数は JISC 8955 に示されておらず、参考となる資料もほとんどない。そこで、営農型 PVS を対象とした風圧実験と空力実験の概要と結果を以下に示す。

使用した風洞は (株) 大林組技術研究所所有の多目的大型風洞実験装置である。風洞実験は風圧実験と空力実験共に縮尺 1/50 の模型を用いて行っている。想定した PVS の概要を表 1 に、平面図と立面図を図 1 に示す。なお、一般的な営農型 PV のモジュールの角度は 5 度～30 度程度であり、本実験では 30 度である。

実験風向は、5 度ピッチとし、風圧実験は 0 度から 355 度までの 72 風向、空力実験は模型の対称性を考慮して 0 度から 180 度までの 37 風向である (図 2 参照)。実験気

表 1 想定した PVS 概要

架台	柱スパン：4m×4m 高さ：3m
PV アレイ	5 スパン×5 スパン (20m×20m)
PV モジュール	営農型モジュール (幅約 2m×奥行約 0.4m)
1 スパン当たりのモジュール枚数	N-S 方向 4 段×E-W 方向 2 列
アレイ全体のモジュール枚数	N-S 方向 16 段×E-W 方向 10 列 (全 160 枚)
遮光率	30%
モジュール角度	30 度

(単位：mm)

図 1 想定した PVS の平面図および立面図

流は建築物荷重指針⁵⁾の地表面粗度区分Ⅱを想定した気流である。代表高さ（対象構造物の最高高さ3m）における風速は風圧実験で約10m/s、空力実験で約14m/sであり、乱れの強さは0.26である。サンプリング周波数とサンプリング個数は風圧実験で1000Hzと180,000個であり、空力実験で500Hzと30,000個としている。対象構造物の設計風速は30m/sを想定している。

風圧実験で得られた風圧は、代表高さでの速度圧 q_H を用いて無次元化し、風圧係数としている。ピーク値については実時間0.2秒相当の移動平均をかけたものと、平均化処理を行っていないものの2種類を用い、10分間相当のピーク値の5組のアンサンブル平均によって評価したものである。風力係数は、PVモジュール表面の風圧係数と裏面の風圧係数の差（時刻歴）から求めており、下向きが正である。

風圧実験で得られたPVモジュールに作用する風力係数の全風向中の最大値と最小値（ピーク風力係数）を図3に示す。移動平均にかかわらず最大・最小共に外周に近い部分での絶対値が大きい結果となった。最大値では南側2段程度の絶対値が大きく、移動平均なしでは3.1、0.2秒の移動平均では2.5となった。最小値では北側2段の絶対値大きく、移動平均なしで-4.5、0.2秒の移動平均では-3.2であった。また、中央部付近のアレイでは外周部に比べ、6〜7割程度の風力係数となっており、風力係数を低減できる可能性はあると考えられる。

PVモジュールに作用する風力係数を面積平均して求めたPVアレイに作用するピーク風力係数のうち、全風向中・全アレイの中で最大・最小となったのは、移動平均なしで1.3と-1.9、0.2秒の移動平均で0.96と-1.5であった。このPVアレイに作用するピーク風力係数の最小値はJIS C 8955に示されたアレイ面の風力係数にガスト影響係数を乗じた値（ガスト影響係数を2.1とした場合：-3.9）と比較して、1/2程度であった。

空力実験によって得られた構造物基部での水平2方向（南北方向：X方向，東西方向：Y方向）と鉛直方向（Z方向，上向き正）の風力 F_X, F_Y, F_Z および転倒モーメント M_X, M_Y は、次式により構造物全体の風力係数（全体風力係数） C_{FX}, C_{FY}, C_{FZ} および転倒モーメント係数 C_{MX}, C_{MY} として評価している。

$$C_{FX} = F_X / q_H A_X \quad (3)$$

$$C_{FY} = F_Y / q_H A_Y \quad (4)$$

$$C_{FZ} = F_Z / q_H A_Z \quad (5)$$

$$C_{MX} = M_X / q_H A_X H \quad (6)$$

図2 風向と力の定義

(a) 移動平均なし・最大

(b) 移動平均0.2秒・最大

(c) 移動平均なし・最小

(d) 移動平均0.2秒・最小

図3 全風向中のピーク風力係数（モジュール）

図4 基部での全体風力係数と転倒モーメント係数

$$C_{MY}=M_V/q_H A_X H \quad (7)$$

ここで、

C_{FX}, C_{FY}, C_{FZ}	: 基部での各方向の全体風力係数
C_{MX}, C_{MY}	: 基部での各方向の転倒モーメント係数
F_X, F_Y, F_Z	: 実験で得られた各方向の風力(N)
M_X, M_Y	: 実験で得られた各方向の 転倒モーメント(Nm)
A_X	: 実験模型の代表面積 (=0.025195m ²)
H	: 実験模型の最高高さ (=0.06m)
q_H	: 高さ H における基準速度圧(N/m ²)

なお、 A_X は南北方向の真横からみた投影面積であり、風向と力の方向の定義は図2に示すとおりである。

空力実験で得られた基部での全体風力係数と転倒モーメント係数を図4に示す。全体風力係数は、南北方向(X方向)の方が東西方向(Y方向)より絶対値が大きく、-0.17となり、Z方向では絶対値最大で-0.11であった。また、 C_{MX} は南西の風向に相当する120~180度付近で負の値とはなっておらず、そのため90度に対して対称な分布にはならない。これは風上(南側)の一部分に対してだけ強い正圧が生じるためであると考えられる。

なお、本稿で示した営農型PVSのピーク風力係数および基部での全体風力係数等は、あくまでも表1に示したPVSを対象とした実験結果であり、全ての営農型PVSに用いることができる値ではないことに留意されたい。

3. 3 設計用速度圧(風速)の再現期間の考え方

JIS C 8955では、一般的なPVSの設計速度圧を再現期間50年の速度圧として与えている。しかし、営農型PVSの架台は容易に撤去できるものでなければならない。それを理由に風荷重を低減しても良いということにはならないが、営農型PVSと比較的条件(地質や周辺環境)に近い畜舎では、特定畜舎等建築物の種類により設計風速の低減率が定められている。畜舎設計基準⁹⁾では、「滞在強度(人・時間)/(50m²・年)」という概念により、施設区分をIのa(乳牛舎、肉牛舎、豚舎など)、Iのb(堆肥舎、堆肥舎の付属室)、II(搾乳舎、生乳処理室など)、III(施設区分IおよびII以外)の4つに分け、施設区分に応じた換算係数(風速の低減率) R_w を設けている。この換算係数を、風速の再現期間に換算すると、Iのaから順に、20年、12年、30年、50年に相当する。国土交通省告示第474号⁷⁾に示されている風圧力の低減率についても、同様に風速の再現期間に換算すると堆肥舎は12年、飼養施設では20年、搾乳施設等では30年である。

畜舎設計基準によると、イギリス(BS-5502, Part22. 1993年)では、滞在強度だけでなく、道路または住居までの最小距離によって農業建築物を4つに分類しており、クラスに応じた設計荷重の低減がなされている。最小距離が30mの場合は最小設計年数を2年、20mの場合は10年、10mの場合は20年、限定なしの場合は50年としている。

営農型PVSにおいても、滞在強度や道路または住居までの最小距離によって風荷重を低減することも考えられるが、そのためには、営農における滞在強度の調査や、アレイの飛散距離に関する調査が必要である。アレイの飛散距離については、平板を対象とした飛散範囲や飛散物の軌道に関する研究成果^{8),9)}を参考にすることも可能と考える。ただし、架台からはずれたアレイの飛散距離の設定にあたっては、着地後の挙動も考慮する必要がある。

4. まとめ

本稿では、営農型PVSの特徴をあげ、強風被害の事例を示した。また、営農型PVを対象とした風洞実験(風圧実験および空力実験)で得られたPVモジュールおよびアレイの風力係数の一例を示した。

謝辞

本稿に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)の委託研究「太陽光発電システム長期安定電源化基盤技術開発プロジェクト」の成果の一部が含まれております。

参考文献

- 1) 農林水産省食料産業局バイオマス循環資源課再生可能エネルギー室、「営農型太陽光発電について」、<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/attach/pdf/einou-30.pdf>, (2020.1)
- 2) 農林水産省、「営農型太陽光発電取組支援ガイドブック(2018年度版)」,
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/attach/pdf/einou-26.pdf>, (2020.1)
- 3) 日本風工学会,「太陽光発電システム耐風設計マニュアル」,(2017.2)
- 4) 日本規格協会,「JIS C 8955 太陽電池アレイ支持物の設計用風荷重算出法」,(2017)
- 5) 日本建築学会,「建築物荷重指針・同解説 2015」,(2015)
- 6) 社団法人日本畜産施設機械協会, 建築大臣認定「畜舎設計基準・同解説」,(2000.8)

- 7) 平成 14 年国土交通省告示第 474 号,「特定畜舎等建築物の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件」,(2002.5)
- 8) 立川正夫,「飛散物の飛散範囲の推定方法 台風時の飛散物の軌跡と速度に関する研究 その 5」,日本建築学会構造系論文報告集,第 363 号,pp.42-49,(1986.5)
- 9) J. D. Holmes, C. W. Letchford, Ning Lin, “Investigations of plate-type windborne debris -part II: Computed trajectories”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94, pp.21-39, (2006)