

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420593

研究課題名(和文)メガソーラーおよび大規模屋上設置形太陽光発電システムの風荷重低減法の開発

研究課題名(英文) Study on wind force reduction method acting on solar array and roof mounted photovoltaic system

研究代表者

吉田 昭仁 (Yoshida, Akihito)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：90329219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、国内で急激に需要が増加しているメガソーラーなどの大規模太陽光発電施設や工場などの大規模建築物の屋上に設置される屋上設置型太陽光発電システムの構造設計を行う上で最も重要となる風荷重について明らかにするとともに、これらの風荷重を低減することを可能とする風力低減法を開発することである。この研究は今後更に設置の増加が予想されるメガソーラーや屋上設置型太陽光発電システムの経済的かつ合理的な耐風設計を行う上で必要不可欠な課題である。本研究期間において、大別して7項目の研究を実施し、地上設置型および屋根設置型ソーラーアレイに作用する風荷重を把握し、風荷重を低減するための種々の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Solar energy is recognized as a promising energy source, and photovoltaic (PV) systems are commonly used to collect it. Many kinds of systems have been designed and proposed, depending on the purpose (such as roof-mounted systems for domestic use or ground-mounted systems for mega-scale photovoltaic systems). However, some PV systems have recently been damaged by strong wind. Wind tunnel tests are commonly used to verify the wind-resistant performance of these systems and thus find ways to prevent this kind of damage. In this paper, we clarify the mitigation effects of wind load acting on a PV system using aerodynamic appendages such as hanging walls and eaves. The mean forces and moments acting on a PV system model are measured in a wind tunnel using a six-component High Frequency Force Balance.

研究分野：耐風構造

キーワード：メガソーラー 太陽光発電システム 風荷重 風力低減

1. 研究開始当初の背景

近年のエネルギー不足を解消するため、枯渇する心配が無く、かつ二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギーとして太陽光発電が注目されており、日本における太陽電池出荷量も 2001 年から 2011 年の 10 年間で 188,590kW から 2,685,573kW へ約 14 倍になるなど、需要も急激に増加している。日本国内では日本工業標準調査会が「太陽電池アレイ用支持物設計標準」(JIS C 8955, 以下 JIS と略す。)を定めており、それに基づいて設計されることが多い。JIS で規定されている設計用風荷重は風力係数に設計用速度圧とモジュールの受風面積を乗じることで算定できる。なお、風力係数は風洞実験により定めるとしているが、地上設置(単独)、勾配屋根設置型、陸屋根設置型の設置形態については、モジュールの設置勾配で表わされる式により定められる風力係数を用いても良いとしている。しかしながら、JIS の基となった実験はかなり以前に行われたものであり、当時は現在急激に増加しているメガソーラーや大規模工場の屋根設置型太陽光発電システムなどは考えられていない。例えば、メガソーラーなどでは限られた敷地で発電量を最大とするために、モジュールの設置勾配を 5 度、10 度程度とすることが多いが、JIS では設置勾配 15 度以下は対象としておらず、結果的に風荷重をかなり過大評価している。また、JIS の屋根設置型モジュールの風力係数は地上設置型のものと同じ値として与えられている。しかしながら、屋根設置型モジュールに作用する風力は建築物の高さおよび平面形状やモジュールの設置位置によって変化することは明らかであり、申請者らが事前に行った実験結果によると、JIS をそのまま適用するとモジュールの風荷重を過小評価する場合があることが明らかにされている。

一方、今後もメガソーラーや大規模な屋根設置型太陽光発電システムが増加することが予想され、経済的な設計が求められることが多くなっている。太陽光発電システムの構造設計をする場合には地震荷重は重要ではなく、風荷重で設計が決まるため、設計用風荷重を低減させることができれば、架台材料費等のコストを低減させることが可能となり、今後のメガソーラー等の設置が促進されることが予想され、我が国のエネルギー対策に多大な影響を及ぼすと考えられ、喫緊に取り組むべき課題であるとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、国内で急激に需要が増加しているメガソーラーなどの大規模太陽光発電施設や工場などの大規模建築物の屋上に設置される屋上設置型太陽光発電システムの構造設計を行う上で最も重要となる風荷重について明らかにするとともに、これらの風荷重を低減することを可能とする風力低

減法を開発することである。また、太陽光発電モジュールを設置する架台の設計に用いられている現行の JIS 規格における問題点を明らかにし、実情に即した風荷重の算定方法を明確にするために種々の風洞実験を行い、太陽光発電システムの合理的な耐風設計法を確立する。この研究は今後更に設置の増加が予想されるメガソーラーや屋上設置型太陽光発電システムの経済的かつ合理的な耐風設計を行う上で必要不可欠かつ喫緊に取り組むべき重要な課題である。

3. 研究の方法

本研究の最終目的は急激に普及が進んでいる太陽光発電施設の合理的な耐風設計手法の確立および風力低減法の開発であり、この目的を達成するために3カ年で計画を立てている。初年度には種々の風洞実験、諸外国の文献調査を行い、地上設置型太陽光発電システムおよび屋上設置型太陽光発電モジュールの風力特性について詳細に検討するとともに、次年度に検討を行う屋根面外圧からモジュールの風力を推定するための Conversion Factor を決めるための風圧実験も実施する。また、ソーラーアレイの風力特性について詳細に検討するとともに、単独時との風力を Shielding Factor として整理する。2 年目は Conversion Factor の検討に加え、地上設置型ソーラーアレイの風力低減法の開発に着手する。ソーラーアレイ外周やモジュール自身に設置する空力的付属物の影響について詳細に検討を行う。最終年度には 2 年目に得られた地上設置型ソーラーアレイの風力低減法に基づいて、屋上設置型太陽光発電施設の風力低減法の開発を行う。詳細な研究項目を下記に示す。

(1) 諸外国における太陽光発電モジュールの耐風設計、設置状況に関する文献調査

メガソーラー等の大規模太陽光発電施設は日本に限らず世界中で急激に増加しているため、各国における耐風設計法の文献調査を行い、各国で実施されている地上設置型および屋根設置型太陽光発電モジュールの耐風設計法の相違点を明らかにする。

(2) Wind Shield・空力的付属物による風力低減効果に関する風洞実験

太陽光発電モジュールの風力を低減させる最もシンプルな手法はモジュール周囲に Wind Shield を設置することであるが、設置位置、設置高さ、充実率など、様々なケースが考えられる。Wind Shield についての既往の研究調査を行うとともに、種々のパラメータで再現された Wind Shield を用いて風洞実験を行い、その効果を調べる。しかしながら、Wind Shield そのものに作用する風力についても考慮する必要があるため、風速の低減効果だけでなく、Wind Shield の風力測定も同時に行う。また、太陽光発電モジュール自身

に空力的に効果が見込まれる付属物を取り付けることによる風力低減について調査を行うため、モジュール架台部分に種々の形状、寸法、充実率の付属物を設置して実験を行う。その際には空力的付属物の位置によっても影響が異なると考えられるため、設置位置についてもパラメータとする。また、ソーラーアレイにも適用を試み、外周部のモジュールに設置した空力的付属物と Wind Shield との複合効果についても風力実験により調査し、ソーラーアレイの風力低減法を詳細に検討する。

(3) 地上設置型太陽光発電モジュール単体時の風力特性の調査

JIS C8955 で規定されている地上設置型太陽光発電モジュールの風力係数は風洞実験に基づいて決められた値であるが、当時の風洞実験では風洞床面に太陽光発電モジュールを設置して、床面境界層の内部で実験を行うなど、実情に即したものとなっていないため、本研究項目では地上設置型太陽光発電モジュール単体時の風力係数を明らかにするために風力実験を行う。

(4) 建築物屋根面に作用する風圧力の調査

屋根設置型太陽光発電モジュールの風力係数はその建築物形状やモジュール設置位置、設置勾配によって異なることは容易に想像できるが、現行の JIS では設置勾配を除いて全て一律の値を用いることとしている。建築物形状やモジュール設置位置で異なる風力係数を JIS で定めるのは非常に困難である。次年度の研究項目としてあげられている屋根設置型太陽光発電モジュールの風力推定のためのコンバージョンファクターを提案するために、モジュールが一切設置されていない状態での建物屋上面の風圧測定を行う。

(5) 屋根設置型太陽光発電モジュールの風力特性の調査

JIS で規定されている屋根設置型の太陽光発電モジュールの風力係数は、地上設置型太陽光発電モジュールの風力係数と同じ値を用いている。しかしながら、建物形状やモジュール設置位置によって、作用する風力が異なるため、現行の JIS は実情に即していない。これらの問題を打破するために、建築物形状、モジュール設置位置、モジュール設置勾配等を変化させた風洞実験を行い、屋根設置型太陽光発電モジュールの風力特性を詳細に調査する。

また、屋根設置型太陽光発電モジュールの風力低減についても風洞実験を行う。空力的付属物を設置した屋根設置型のモジュールの風力測定を行うためには、微小風力の測定が可能な動的天秤が必要となるため、購入予定の歪みゲージ式 3 分力計（共和電業 LSM-B-SA1）を用いて風力実験を行う。

(6) ソーラーアレイの風力特性の調査

メガソーラーなど複数のモジュールが設置される場合にはモジュール設置位置によっては、周囲の状況が異なるため、遮蔽効果による風力の低減が期待できる。現行の JIS では外周部と中央部の 2 種類の風力係数を与えているが、申請者らのこれまでの調査では外周部でも隅角部と周辺部の風力係数は異なることが明らかとなっている。そのため、本項目では種々のソーラーアレイの風力特性を風洞実験により調査する。

(7) 屋根設置型 PV 用コンバージョンファクターの検討

屋根設置型モジュールの風力係数は建物形状寸法やモジュール設置位置、設置角度等のパラメータにより複雑に変化してしまうためであり、一律な風力係数の定義は不可能であると言える。そこで、前年度実施した建築物屋根面の外圧係数の実験結果と同形状の建築物屋上に設置されたモジュールに作用する風力との関係性について詳細に調査を行い、屋上面外圧係数からモジュールの風力係数を算定することのできるコンバージョンファクターを提案する。

上記の(1)から(7)の研究項目を総括し、メガソーラーおよび屋根設置型大規模太陽光発電施設の合理的な耐風設計手法を提案する。また、太陽光発電モジュールに作用する風力を低減する方法を確立し、今後も急激に増加すると考えられる太陽光発電システムの合理的かつ経済的な耐風設計手法の提案を目指す。

4. 研究成果

研究方法で挙げた 7 項目の研究成果を下記に示す。

(1) 諸外国における太陽光発電モジュールの耐風設計、設置状況に関する文献調査
メガソーラー等の大規模太陽光発電施設は日本に限らず世界中で急激に増加しているおり、国内外の研究者により様々な研究が行われている。その国内外の研究成果を収集し、文献調査を行い、各国で実施されている地上設置型および屋根設置型太陽光発電モジュールの耐風設計法の相違点を明らかにした。

(2) Wind Shield・空力的付属物による風力低減効果に関する風洞実験

図 1 に示すような幅 225mm、奥行き 300mm の平面を持つ、パネル勾配のソーラーパネル風力模型に、長さ l や充実率の異なる遮蔽板等の付属物を取り付けて風力実験を行った。なお、模型端部から遮蔽板等の付属物までの距離を d とし、模型の幾何学的縮尺は $1/6.7$ とした。実験気流は、模型頂部で 10m/s とし、実験風向は図 2 に示す 1 風向のみとし

た。図 2 に示した風力と実験風向の定義に従って、風方向の風力を F_x 、鉛直方向の風力 F_z をとして、 F_x と F_z の合力を F とした。また、風直交方向の軸回りのモーメントを M_y とした。また、各成分の平均風力係数、平均モーメント係数を次式のように定義した。

$$\overline{C_F} = \frac{\overline{F}}{q_H A} \quad \overline{C_{M_y}} = \frac{\overline{M_y}}{q_H A h}$$

ここで、 q_H : 頂部速度圧、 A : パネル面積、 h : 代表長さとする。

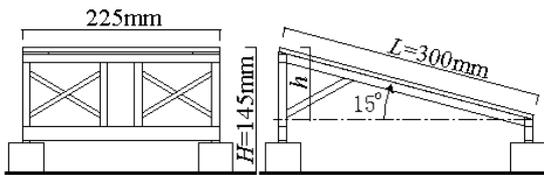


図 1 実験模型の形状寸法

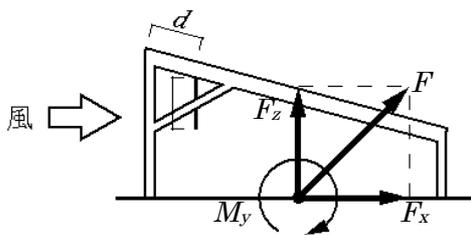


図 2 風力と実験風向の定義

図 3 に平均風力係数の遮蔽板長さ ℓ の違いによる変化を示す。平均風力係数は、 $\ell=60\text{mm}$ で最も小さくなり、遮蔽板が無い場合と比べて平均風力係数が 4 割程度低減した。平均モーメント係数は $\ell=40\text{mm}$ で最も小さくなった。

図 4 に平均風力係数の遮蔽板充実率 ϕ による変化を示す。充実率が大きいほど平均風力係数の低減効果は大きくなっているが、充実率が 60% 程度の遮蔽板を用いても遮蔽板が無い場合の平均風力係数と比べて 3 割程度の低減効果があることが分かった。

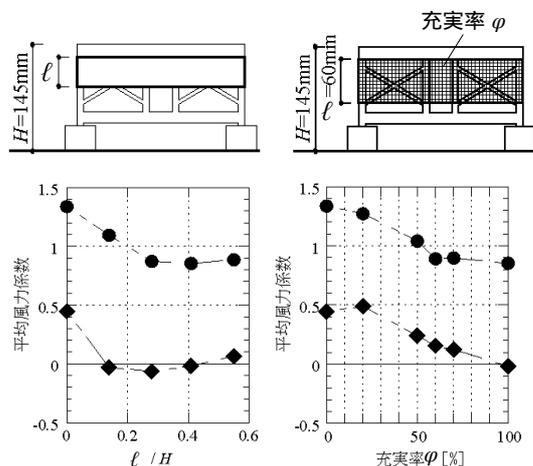


図 3 平均風力係数の遮蔽板長さ ℓ による変化 ($d/L=0$)

図 4 平均風力係数の遮蔽板充実率 ϕ による変化 ($\ell/H=0.4$)

(3) 地上設置型太陽光発電モジュール単体

時の風力特性の調査

実験模型は図 5 に示すような幅 300mm、奥行き 600mm、厚さ 5mm で、風圧測定孔を表裏面にそれぞれ 72 点設けた、パネル勾配の異なる 6 種類のパネルである。なお、模型の幾何学的縮尺は 1/3 とした。実験気流は、乱流格子を設置して乱れ強さ I_u を 3 段階に変化させた一様乱流である。実験風向は、模型の短辺方向に正対する風向を 0° とし、 5° ピッチで 180° まで全 37 風向とした。サンプリング周波数は 50Hz とし、実時間 10 分相当(約 600 秒)のデータを各風向で 1 サンプル計測した。また、風圧記録を空間積分して得られるパネル風力は上向きを正とした。

図 6 に平均パネル風力係数の全風向中の最大値、最小値(以下、最大、最小平均パネル風力とする)と JIS C 8955 (以下、JIS と略す)の値のパネル勾配による変化を示す。乱れ強さ I_u によるパネル風力係数の変化は殆ど見られなかった。パネル勾配の $I_u=5.5\%$ 、 9.5% の最大値および $I_u=0.5\%$ では JIS を超えた値を示した。このとき JIS から最も離れており、風力係数の差は 0.3 となった。

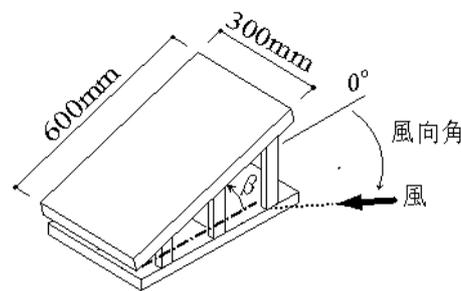


図 5 地上設置型ソーラーパネル風圧模型

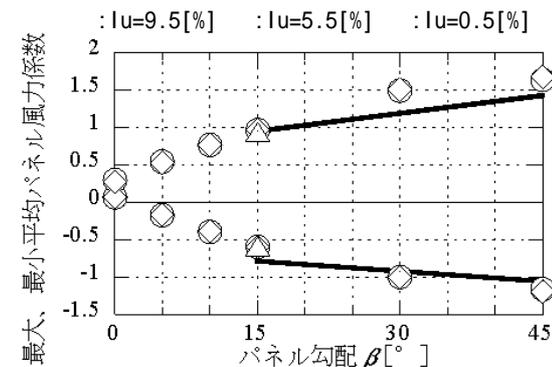


図 6 最大、最小平均パネル風力係数と JIS 規格値のパネル勾配による変化(地上設置型)

(4) 建築物屋根面に作用する風圧力の調査

次の項目で実施する屋根設置形 PV に作用する風力と PV が無い場合の屋根面の風圧力の相関について検討をするために、工場を想定した低層構造物の屋根面に作用する風圧測定を実施した。風圧計測は積分して風力を算定できるように $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の中に 5mm 間隔 (20 行 \times 20 列、合計 400 点) と非常に密

に設けて同時計測した。その密に設けた風圧測定パーツを模型屋根面の隅角部，端部，中央部の3か所に設置し，風向を0°から360°まで5°刻みで変化させて屋根面に作用する風圧特性の把握を行った。

(5) 屋根設置型太陽光発電モジュールの風力特性の調査

図7に示す様に模型縮尺1/200の高さ130mm，幅300mm，奥行き300mmの陸屋根模型を用いて風洞実験を行った。陸屋根上に設置したアレイは，幅40mm，奥行き20mmであり，アレイ勾配は0°，5°，10°，15°，30°，45°の6種類である。設置位置は隅角部，端部，中央部(図7の塗りつぶし部分)の3種類である。なお，隅角部，端部に設置する場合には，北側(アレイ上端部が外周側に向いている場合)，南側(アレイ下端部が外周側に向いている場合)の2方向について検討している。実験風向は隅角部設置の場合は0°~360°まで5°刻みに73風向，端部と中央部設置の場合は0°~180°まで5°刻みに37風向とした。実験気流は日本建築学会の建築物荷重指針・同解説2004に記載されている=0.20(地表面粗度区分 相当)の境界層流を模擬した。

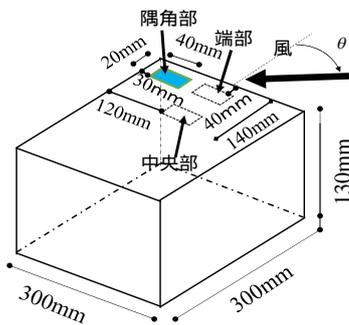
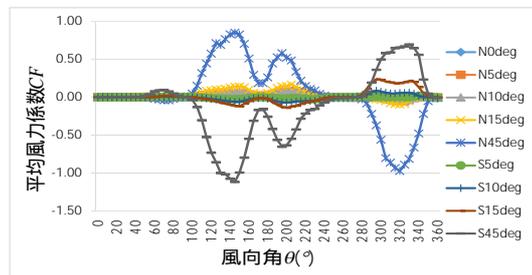
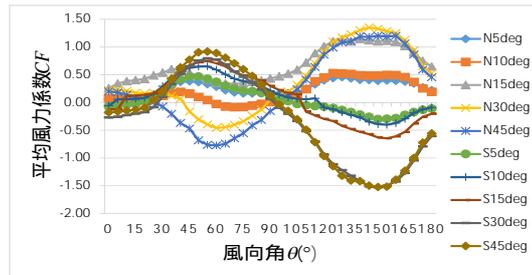


図7 陸屋根模型寸法と風力模型設置位置

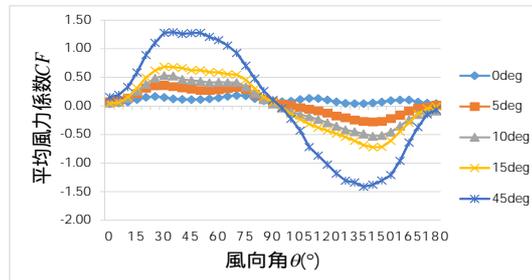
図8に各設置位置における平均風力係数CFの風向角による変化を示す。図8(a)の隅角部では，北側隅角部(アレイ上端が外周側に向いている場合)のときに，=45°，=145°で最大値0.85を示し，=320°で最小値-0.97を示す。南隅角部では，45°，=145°で最小値-1.12を示し，=330°で最大値0.7を示した。これらのことより本実験範囲内では，平均風力係数はアレイが風にあおられる風向において概ね負側のピーク値を示し，アレイ面を押さえつけるような風向で正側のピーク値となることが分かった。また，平均風力係数の最大値，最小値はモジュール勾配が増加するに従い，風力係数も大きくなるということが分かった。しかしながら，モジュール単体の場合は設置位置による影響はあまり見られなことが分かった。



(a) 隅角部



(b) 端部



(c) 中央部

図8 平均風力係数CFの風向角による変化

(6) ソーラーアレイの風力特性の調査

図9に複数のソーラーアレイに作用する鉛直方向最大平均風力係数を示す。A列の中では，全風力係数のうちA1のCFzが風向角15°で最も大きく，0.8程度であり，A2以降のアレイ設置位置では風向角45°付近の時に最大値となった。全風向角中の最大値と比較すると，A1の次がA5であり，次いでA4，A3，A2となるに従いCFzの最大値が小さくなった。B1およびC1ではA1と同様に風向角15°の時にCFzが最大となったが，A列から離れるに従い風力係数の低減がみられた。B2-B5およびC2-C5では風向角15°~45°で最大となり，風向角90°付近でほぼ0となった。

ダミー模型

		0.7 (15°)	0.7 (15°)	0.8 (15°)
		0.1 (30°)	0.3 (45°)	0.5 (45°)
		0.2 (30°)	0.2 (15°)	0.5 (45°)
		0.2 (15°)	0.4 (15°)	0.5 (45°)
		0.3 (15°)	0.4 (15°)	0.5 (45°)

()内の数値は最大の \bar{C}_{Fz} が発生した風向

図 9 複数模型に作用する鉛直方向最大平均風力係数

(7)屋根設置型 PV 用コンバージョンファクターの検討

項目(4)と項目(5)の結果を基に、屋根面の風圧力から屋根設置型ソーラーアレイに作用する風力を推定することを可能にするコンバージョンファクターについて検討を行った。モジュール勾配および設置位置毎にモジュール風力と屋根面風圧力との相関を詳細に検討を行ったが、本項目については今後更なる検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

- 1) Jinxin Cao, Akihito Yoshida, Proshit Kumar Saha, Yukio Tamura, Wind loading characteristics of solar arrays mounted on flat roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 123, Part A, pp.214-225, 2013 (査読無し)
- 2) 吉田昭仁, ソウジンシン, 田村幸雄, 屋上設置型ソーラーアレイの風圧・風力特性, 日本風工学会誌, Vol.38 No.2(No. 135), pp.193-194, 2013 (査読無し)

[学会発表](計3件)

- 1) 吉田昭仁, 伊藤高志, 飯田泰彦, 田村幸雄, 地上設置型ソーラーアレイの風力特性の外周フェンスによる影響, 日本建築学会年次大会(北海道), 北海道大学, B-1, pp.165-166, 2013年9月1日
- 2) 吉田昭仁, 群馬県伊勢崎市で発生した竜巻による太陽光発電システムの被害およびその他建築物の被害, 風災害フォーラム in 伊勢崎, 群馬県伊勢崎市, 2015年11月8日

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉田昭仁 (Akihito Yoshida)
東京工芸大学・工学部・教授
研究者番号: 90329219

(2)研究分担者

田村幸雄 (Yukio Tamura)
東京工芸大学・工学部・名誉教授
研究者番号: 70163699

松井正宏 (Masahiro Matsui)
東京工芸大学・工学部・教授
研究者番号: 60350576

(3)連携研究者

なし