

「JFE ソーラーアレイ™」の開発

Development of “JFE Solar Array™”

坂本 義仁 SAKAMOTO Yoshihito JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)
村上 琢哉 MURAKAMI Takuya JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
安田 博和 YASUDA Hirokazu JFE シビル 建築事業部 建築設備部長

要旨

JFE スチール、JFE 電制、JFE シビル、JFE 鋼板の 4 社は、2009 年度から、新規分野での鉄需要創出と差別化技術の提供のため、産業用太陽光発電市場に注目し、大規模太陽光発電用架台システム「JFE ソーラーアレイ™」の開発を共同で実施してきた。架台は、部材合理化、設置効率向上のために、低傾斜角 4 脚跳ねだし構造とし、低傾斜角化にともなう作用風力の検証をはじめとした耐風性能評価、新接合部構造の性能評価などにより、構造安定性、長期耐用性を検証したものである。2012 年度に販売を開始した軽量モデルは、構造合理化、部材最適化を進めて大幅な低コスト化と、40 kg/kW を下回る軽さを実現して競争力を高めたもので、2012 年度におよそ 20 MW の受注を果たしている。

Abstract:

“JFE solar array™” is ground-mounted support structure for solar power plant. Its series of developments started by JFE Steel to create a steel market in the renewable energy field in 2009. Low angled overhang structure with four support posts was proposed in order to save materials and improve area occupancy. Its structural stability and long term durability were confirmed by structural and aerodynamic approach. The lightweight model is a flagship model that realized lightness less than 40 kg/kW and achieved bigger cost reduction by large rationalization of the structure and the optimization of the material. Orders about 20 MW was received in 2012.

1. はじめに

2008 年 7 月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」¹⁾における太陽光発電の導入目標について、2008 年 11 月に「太陽光発電の導入拡大のためのアクションプラン」²⁾が策定され公開された。太陽光発電の導入目標は、2020 年には 2005 年の 10 倍である 14 GW、2030 年には 40 倍の 53 GW が示され、特に産業用太陽光発電の割合を 2020 年の 2 割 (2.8 GW) から最終的に 4 割 (22.4 GW) に拡大することが示された³⁾。産業用の太陽光発電は、2008 年度の電力会社の合計 100 MW を超える設置計画⁴⁾を皮切りに導入が加速され、2012 年度以降は、全量買取制度の 42円/kWh という当初の想定を上回る買取価格が追い風となって、出力がメガワット (1 MW=1 000 kW) 以上の大規模太陽光発電所が、急速に普及する動きをみせている⁵⁾。

JFE スチール、JFE 電制、JFE シビル、JFE 鋼板の 4 社は、2009 年度から新規分野での鉄需要の創出を目的に、産業用太陽光発電市場に着目し、10 MW/年以上の受注を目指し、目標コストを従来 (溶融亜鉛めっき形鋼 HDZ55 相当による小型架台) 比 50%以下 (開発当時) に設定した大規模太陽

光発電用架台システム「JFE ソーラーアレイ™」の開発を共同で開始した。大型不等沈下対応モデルの開発を経て、鋼材重量 40 kg/kW 未満の軽量モデルを完成させ、2012 年度には JFE 電制をシステムインテグレーターとして、JFE スチールグループ (JFE スチール、JFE シビル、JFE 鋼板、および JFE 鋼管) が協力して、営業、開発、設計、製造、建設に対応する体制で臨み⁶⁾、およそ 20 MW の受注を果たしている。本報では、JFE ソーラーアレイ™ シリーズの特徴と技術的検討について、その一部を紹介する。

2. JFE ソーラーアレイ™ の特長

2.1 不等沈下対応モデルの概要

大規模太陽光発電所は、港湾地区の埋立地や産業廃棄物処理場跡地など、これまで有効利用を図ることが難しかった未利用地に計画される場合が多い。これらの建設地の多くは、地盤がまだ安定していない超軟弱地盤である場合が多く、全体沈降のほか不等沈下の発生が予想された。不等沈下が生じると、架台・基礎の変形・破損のほか、太陽電池モジュール (以下、PV パネル) にも不具合を発生させる可能性がある。不等沈下対策としては、基礎・架台を小型化・剛体化する事例⁷⁾や、傾斜角補正にアンカーボルトを延伸



写真1 「JFE ソーラーアレイ™」モックアップモデル
Photo 1 “JFE Solar Array™” mock-up model

して対処する事例⁸⁾が見られる。架台の耐久性は、沿岸地域において15年から20年の運転を想定し、溶融亜鉛めっきHDZ55以上の防食仕様が一般的である⁹⁾。

JFE スチールグループは、沿岸地域の超軟弱地盤への建設を想定し、相対沈降差300 mmまでの不等沈下に対応することを前提に、部材耐久性の確保、使用部材の最適化、沈降応力による架台の損傷防止と基礎の合理化について、これまでの架台構造を抜本的に見直して総合的に検討をすすめた。そして、2009年に低傾斜角4脚型大型鋼管構造架台の開発を行ない、2010年にJFE スチール東日本製鉄所(京浜地区)内に、写真1に示す定格出力10 kW規模のモックアップを建設した。以下に検討プロセスと主な特長を述べる。

2.1.1 全体計画

部材耐久性確保と軽量化推進のため、板厚4.5 mm以下の部材には、HDZ55以上の耐久性を有する高耐食性溶融めっき鋼板(いわゆるプレめっき)エコガル®を採用して板厚を低減した(構造設計で板厚4.5 mmを超える部材にはHDZ55以上の溶融亜鉛めっき(いわゆるドブ浸けめっき)を採用)。溶融亜鉛めっき仕様では、必要構造強度よりも熱プロセスによる変形防止の観点から部材板厚が決定してしまう場合が多く、高耐食性溶融めっき鋼板の活用は、部材合理化に有効なポイントである。

最小重量の追求とコスト最適化のため、部材形状と配置方法を検討した。根太と梁は角形鋼管($t=1.6\sim 3.2$ mm)に成型して用い、梁は2本一組の組み合わせ梁として部材を小断面化して統一した。そして、根太・梁をそれぞれ剛性最適点で2点支持し、前後左右に対称な跳ねだしを有する独立4脚支持構造(特開2011-238665)としてさらに軽量化を進めた。

架台と基礎コストの最適バランスと、不等沈下に対する変形角抑制を考慮して、支柱スパン5~6 m程度、アレイ面(PVパネル設置面)10 m×10 m程度の大型架台となった。架台傾斜角は、設置効率の向上と作用風力低減のため、およそ10°とすることでさらに軽量化を進め、アレイ離隔距離を活用して、車両を通せる4 m幅以上の保守路を南北に確保できるようにした。これらによって、従来比30~50%の軽量化と基礎工事の大幅合理化、保守効率の向上を果たし

ている。

2.1.2 構造計画

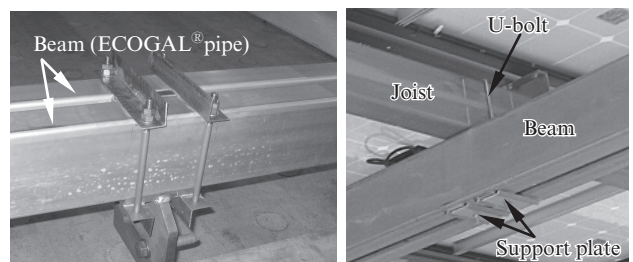
太陽光発電用架台は、建築基準法の適用範囲外であるため、その範囲外の材料、構造方法についても、独自の検証を行なって採用している。構造設計は、JIS C 8955-2004「太陽電池アレイ用支持物設計標準」¹⁰⁾に準拠しており、耐風設計条件は、設計用基準風速38 m/s以下、地表面粗度区分Ⅲ、用途係数Ⅰを標準としている。風力係数は、JIS C 8955-2004を準用し、安全側に推定したが、形状を詳細に再現した各種風洞実験によって、低減可能であることを確認している。これらの結果を反映することで、より軽量化が可能となり、全体沈降の抑制、部材削減、基礎小型化に寄与する。耐風関連の検討事例については「3. 耐風・振動特性」に概要を示す。耐雪設計は、地上垂直積雪量30 cm、雪の平均単位体積重量 $20\text{ N/cm}\cdot\text{m}^2$ を標準とした。耐震設計は、地域係数1.0、用途係数1.0、設計用水平震度1.0である。基礎設計では、架台脚下端に生じる荷重(自重、暴風時、積雪時、地震時)を考慮し、長期接地圧 20 kN/m^2 以下、短期接地圧 40 kN/m^2 以下、転倒および滑動に対する安全性を考慮している。

2.1.3 母材無加工接合構造(特開2012-69929)

製作工数削減と、部材耐久性維持の観点から、接合部の母材無加工化を進めた。梁は、2本の梁部材間に支点部材を挟みこみ、エポキシ樹脂による接着と外締め工法を併用して一体化した組立て梁を開発している。エポキシ樹脂は、せん断力の伝達のほか、接合面内の隙間腐食防止対策を兼ね、また、外締め部材は、接着面の圧着と機械的回り止めを兼ねた構造になっており、接着剤の硬化を待たずにストックヤードに移動できるため、歩留まり向上にも寄与する(写真2(a))。

根太と梁の接合は、組み合わせ梁の間隙部に角Uボルトを通し、梁下面に接着した支持プレートに連結する工法を開発して採用した(写真2(b))。

エポキシ接合部は、複合サイクル試験(CCT)後の静的せん断試験や疲労試験(300万回以上)により、許容耐力を設定している。



(a) Fabricated beam

(b) Beam-joist

写真2 母材無加工接合構造

Photo 2 Joint structure without the processing of the component

2.1.4 フレキシブル構造（特開 2012-69929）

フレキシブル構造とは、不等沈下による架台損傷の防止と不等沈下による変位差補正を可能とした構造で、沈降による架台変形を追従させる沈降応力緩和機構と伸縮柱による沈降補正機能を有する構造である。本構造では、単柱の最大沈降差 300 mm までの補正が可能で、対角沈降による変位差 200 mm でも構造上の問題が発生しないことを実験で確認している。模擬沈降試験の状況を写真 3 に示す。

(1) 沈降応力緩和機構

沈降応力緩和機構の構造を写真 4 に示す。各支柱の沈降相対差に起因する、梁や根太の傾斜角変化と材長変化にともなう応力を、支柱と梁の接合部のスライド・回転機構により吸収し、柱梁接合部の作用応力と基礎の転倒モーメントなどを緩和している。梁と根太には、ねじれに強い角形鋼管を採用するとともに、写真 2 (b) でも示したように、各接合部は角 U ボルトとばね板で弾性的に支持する構造として変形追従性と必要強度を確保しており、PV パネルも、架台に対して弾性的に 4 点支持する構造として損傷を防止している。

①傾斜方向 柱・梁接合部

傾斜方向の相対差が発生すると、その支点間距離の変化が大きくなるため、スパン変化による支点位置の移動を拘束しない構造として安全性を高めた。短柱側、長柱側の少なくとも一方の支点をスライドおよび回転可能な長孔としている。

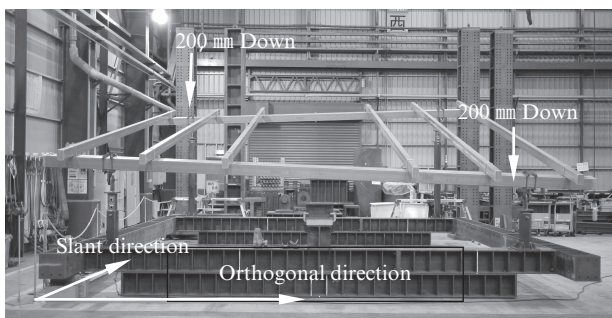
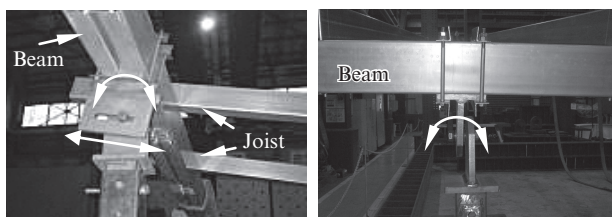


写真 3 沈降模擬試験状況 (対角沈降 200 mm)

Photo 3 Subsidence simulation of opposite angle posts (200 mm down)



(a) Slant direction

(b) Orthogonal direction

写真 4 沈降応力緩和機構

Photo 4 Sedimentation stress-relaxation mechanism joint

②傾斜直交方向 柱・梁接合部

傾斜直交方向に発生する材長変化に対応するために、梁側の支点を、柱側支点のボルト軸上をスライドかつ傾斜可能としている。ボルト部分には、スプリングワッシャーと EPDM (エチレン・プロピレン・ジエン系ゴム) によるダンパーが取り付けられ、常時のがたつきを抑えている。さらに、沈降補正のため伸縮柱は、その上部で傾斜と直交方向に首振り可能な状態で支持しており、梁の傾斜にあわせて柱頭も傾斜することで、よりストレスのかからない構造としている。

(2) 沈降補正機能

補正孔ピッチを 50, 150, 300 mm の位置に配置した、鞘管方式の伸縮柱とした。補正はジャッキアップによるマニュアル制御で、使用する補正孔の組み合わせによって、単柱の相対沈降差 300 mm の範囲であれば ± 50 mm (部材変形角 $\pm 1/120$) 以内に補正可能である。

2.2 軽量モデルの概要

全量買取制度の導入などによる産業用太陽光発電分野への異業種の参入に対抗するために、2011 年度に、競争力をさらに高めた、定格出力 3.5 kW 規模の軽量モデルの開発を行なった (写真 5)。開発にあたっては、大規模な沈降対策はオプションとして、各部の標準化、軽量化および施工合理化をすすめ、最終的に、40 kg/kW を下回る軽さと、40% の施工工数削減を実現している。以下に特長を述べる。

2.2.1 全体計画

先のモデルと同様に、板厚 4.5 mm 以下の部材には、エコガル®を採用し、板厚 4.5 mm を超える部材は HDZ55 以上の溶融垂鉛めっきを採用している。架台構造は、大規模不等沈下対応はオプションとして標準化をすすめ、支柱スパン 2~3 m 程度、アレイ面 5 m×5 m 程度の、低傾斜角跳ねだし 4 脚支持構造とした。使用部材、部材配置、接合方式、基礎構造を大幅に見直して部材点数の削減、部品の共通化、部材・作業の標準化を進め、軽量化、製作・施工の高速化を実現した。

差別化技術としては、新たに、プレキャストブロック基礎

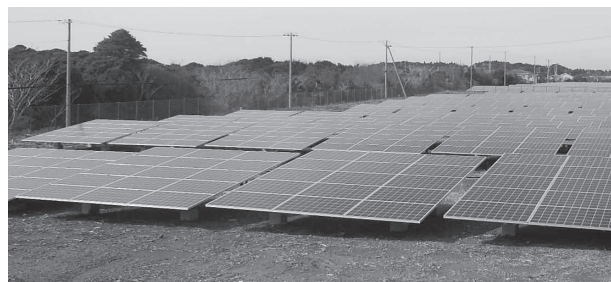


写真 5 「JFE ソーラーアレイ™」(軽量モデル) 建設状況

Photo 5 Construction of "JFE Solar Array™" (Light weight model)

の採用や架台耐久性低下抑制技術を盛り込んでいる。

2.2.2 構造計画

考え方は先のモデルと同様で、指定建築材料以外の材料も採用しているが、構造設計は、JIS C 8955:2011「太陽電池アレイ用支持物設計標準」¹¹⁾に準拠している。耐風設計は、設計用基準風速 38 m/s 以下、地表面粗度区分Ⅲ、用途係数 I を標準としている。風力係数は形状を詳細に再現した各種風洞実験の結果を参考にして決定した。耐雪設計は、地上垂直積雪量 30 cm、雪の平均単位体積重量 20 N/cm³ を標準としているが、多雪地域には雪の平均単位体積重量を 30 N/cm³ 以上に設定して対応している。耐震設計は、地域係数 1.0、用途係数 1.0、設計用水平震度 1.0 である。基礎設計では、架台脚下端に生じる荷重（自重、暴風時、積雪時、地震時）を考慮し、長期接地圧 20 kN/m² 以下、短期接地圧 40 kN/m² 以下、転倒および滑動に対する安全性を考慮している点も先のモデルと同様である。

2.2.3 合理化設計（特願 2012-54971）

(1) 根太弱軸使用と梁小断面分散化

軽量モデルの骨組み構成を**写真 6**に示す。架台軽量化のため、使用部材を全面的に見直し、梁部材には角形鋼管、根太部材、支柱にはリップ溝形鋼を用い、さらに部材配置も最適化した。横架材は鉛直荷重（自重・風による吹き上げ、吹き下ろし）に対して強軸側断面で用いられるのが一般的だが、ここでは、根太と梁の接合部合理化と PV パネル取り付け金物を省略するために、根太は、下方を開断面化した弱軸側断面を使用している。それにあわせて、梁部材は、各支柱に設けたつなぎ梁の両端に分散配置し、根太を 4 点支持構造とすることによって、根太の撓み抑制と部材の薄肉小断面化を両立している。

(2) ブラインドナットの採用

根太・梁接合部を**写真 7**に示す。根太と梁の接合には、建築では通常用いられないブラインドナットを積極的に採用した。採用にあたっては、せん断試験、引き抜き試験、ねじ切り試験など、所定の構造試験を実施して安全性を検証し、許容耐力を設定している。接合方法は極めてシンプルで、根太部材ウェブ（上面）に設



写真 6 「JFE ソーラーアレイ™」の骨組み構造
Photo 6 Framework of the "JFE Solar Array™"

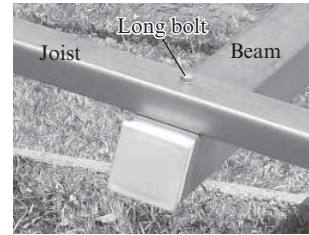


写真 7 梁・根太接合部
Photo 7 Beam-joist joint

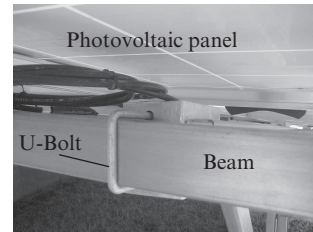


写真 8 角 U ボルト接合部
Photo 8 Square clump bolt joint

けた貫通孔から、梁上面にセットしたブラインドナットに向けて、長ボルトをねじ込む方式としている。長ボルトは、独自の設計を行ない、過締めによる根太のつぶれや、ねじ部の損傷がないようになっており、締め付けトルク管理も容易にしている。

(3) 角 U ボルト接合部

梁とつなぎ梁の接合は、角 U ボルトを用いて梁部材を側面側からクランプする構造とした。梁とつなぎ梁の接合部を**写真 8**に示す。傾斜直交方向の回転とスライドを許容して、架台の損傷を防止するとともに、容易に補正を可能とした構造である。角 U ボルト接合部は、FEM（有限要素法）解析と構造試験を行なって許容耐力を決定した。

(4) PV パネル取付構造

PV パネルには、ボルト・ナットを先付けし、先付けボルト先端を根太ウェブに設けた貫通孔にはめ込んで仮組みできる構造とした。これによって、取付金物を省略するとともに、PV パネル配置が容易になり、さらに、根太下方が開断面になっているので、下側からのナット締めつけも容易になり、施工スピードが大幅に向上した。そして、PV パネルは、先付けボルトを固定するナットによって、根太上面と離隔された 4 点支持構造になっており、暴風時の架台変形への追従を抑制して、PV パネルの変形、損傷を防止している。

2.2.4 差別化技術

(1) プレキャスト基礎（特願 2013-103746）

基礎工事の合理化のため、基礎を新開発のプレキャストブロックとして標準化した。使用材料は、スラグを活用したフェロフォーム®や普通コンクリートなど、建

設地の状況に応じて任意に選択が可能である。

この基礎ブロックは、架台組立工事の工期短縮にも寄与するもので、写真6に示すように、傾斜方向に対称形に連結配置して支柱を仮設し、架台上部構造を組み立てることで、支柱が所定の位置に自動的に配置されるように工夫したものである。さらに、ブロックには大きなピットを設けて軽量化し、運搬の利便性と使用材料の削減をはかっている。基礎軽量化にともなって暴風時のカウンターウエイトとして不足する重量は、基礎工事で発生する掘削土をピット内に全量投入することで確保する。基礎掘削深は、土壌汚染対策法(土対法)対応を考慮し、50 cm 未満となるように設計している。これにより、掘削土の敷地外への搬出、流出がなくなり、廃土処理関連費用の削減がなされ、土対法対応についても、基礎工事は考慮不要となる。

(2) 架台耐久性低下抑制技術(特願 2012-54971)

架台の長期耐久性を確保するためには、鋼材表面自体の耐食性向上のほか、局部的腐食の防止による耐久性低下の抑制が重要である。立地条件によって程度は異なるが、使用過程においてアレイ表面(PVパネル表面)には腐食物質や粒子状物質が堆積し、降雨によって、これら腐食成分を含む雨水が流下する。鋼材は流水によって局部的に腐食が促進されること(流水腐食)が知られており、太陽光発電用架台においては、腐食物質を含む流水が架台の特定部位に集中して付着・滞留することによって、流水腐食は通常よりもより促進されると考えられるため、特に留意すべき点として、その対策を講じている。

JFE ソーラーアレイ™ は、局部的な耐久性低下抑制のため、角形鋼管のシーム溶接部など、一般的に耐食上の弱点となる部分について、溶射による補修とタッチアップを併用し、材料面からの対策はもちろんのこと、跳ねだし構造として、部材弱軸断面配置(開断面下方開口構造)とするなど、架台形状の工夫により、鋼材の濡れ面積、濡れ時間を低減したほか、溶接シーム部の配置方向など細かな部分まで配慮している。

さらに、軽量モデルでは、PVパネルから架台へ到達する流水経路をなくして局部的な架台耐久性低下を防止する、流水腐食防止構造を新たに採用した。この構造は、根太上面と離隔されたPVパネルと、弾性支持させた流水遮蔽部材によって、PVパネル上面からだけではなく、PVパネル裏面に廻り込んでくる流水も遮断するように計画されている。部材の詳細設計は模型による散水実験のほか、Th!nk 地区に建設したJFE ソーラーアレイ™ 軽量モデルでの施工実験、実使用環境下での継続的な状況観察によって決定しており、台風時でもPVパネルから架台に到達する流水経路が形成されないことを確認済みである。

3. 耐風・振動特性

3.1 耐風性能の検証

PVパネルに作用する風荷重はJIS C 8955:2011に風力係数が示されているが、ここにあるアレイ傾斜角は、地上設置型では15°以上であり、15°未満の低傾斜角においては、風洞実験による検証が必要である。JFE ソーラーアレイ™ は、JIS C 8955:2011「5.3.1 モジュール面の風力係数」に示される近似式(以下、JIS 近似式)を準用して設計用標準風力係数(以下、JIS 設計値:吹き上げ1.0, 吹き下ろし0.8)を求めたが、風洞実験によって別途妥当性を検討するとともに、実態に合わせた数値を規定している。

JFE スチールの風洞実験設備(高さ3m×幅2m)を用いて、静的空気力実験を行なった。ここでは、不等沈下対応モデルでの検証事例を示す。JFE ソーラーアレイ™ 模型の縮尺は1/20とし、傾斜角約10°の構造を想定した。概観を写真9に示す。アレイ面の大きさは、奥行き約540mm×幅500mmであり、アレイ面下部の流れを忠実に模擬することを目的として、根太、梁、支柱をモデル化していることに特徴を有している。また、空気力の計測は、模型下部に設置した6分力ロードセルにより、架台に作用する空気力を直接計測した。空気力計測にあたり、計測時間は30秒、サンプリング間隔は200Hzとした。気流は一樣流で実施し、空気力係数算定にあたっての代表風速はパネル高さの中心位置とした。風速分布は高さ方向に一樣であることを別途確認している。

静的空気力の測定結果を図1に示す。風向は頭上げ(風上側パネルが高い風向)となる風向が0°、頭下げが180°、傾斜に対しての横風は風向90°と定義している。その結果、単体パネルにおける風力係数の最大値は0.5以下であり、JIS 設計値の半分程度と小さいことがわかる。風力係数自体の比較については、気流特性、設置傾斜角、模型縮尺、パネル設置高さ、根太、支柱など、パネル以外の詳細部の模型化有無など、実験条件が異なるため単純な比較はできないが、傾斜角10°、一樣流で実施した他の研究機関の結果とおおむね一致している^{12,13)}。文献12)では、実験条件を詳

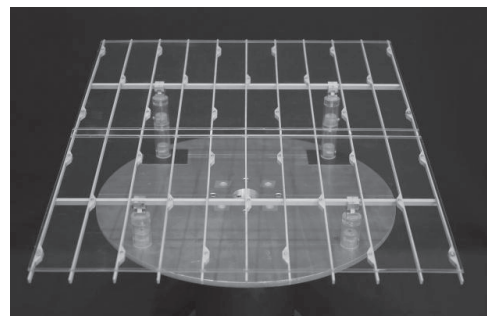


写真9 風洞試験模型(縮尺1/20)

Photo 9 Wind tunnel model (1: 20 Scale)

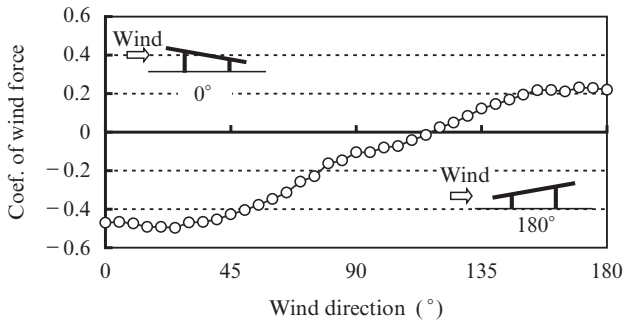


図1 「JFE ソーラーアレイ™」の風力係数

Fig. 1 Coefficients of wind force of "JFE solar array™"

細に記述しており、模型詳細部、支柱は模型化していないこと、地表とパネル最下端の間隔が 25 mm であることが報告されている。その実験結果によると、パネルを風向直角方向に連結した場合の影響については、風向 0° の場合にはパネルの風向直角寸法が長くなるほど風力係数が大きくなるものの、幅が奥行き 8.8 倍（幅 1600 mm、奥行き 180 mm）となった連結パネルの風力係数は 0.8 程度と概ね JIS 設計値と同じことから判断すると、今回 JIS 近似式を準用した設計は設計上安全側になっていると判断できる。また、風向 180° における風力係数は、風向 0° よりも小さくなっている。これは地表と模型との間隔の違い、アレイ詳細部の模型化の違いと判断される。すなわち、根太の存在によるアレイ面裏側からの剥離渦の生成を妨げていることが原因と考えられる。

複数アレイ配置での風力係数についても、縮尺 1/75 模型を用いて別途検証しており、パネル中心間隔をパネル奥行き 1.5 倍とした場合には、2 列目以降の風力係数は半分となることが得られている。これは、配置の工夫によって風力係数が低減できることを示唆しており、パネル配置は発電条件だけでなく、架台の合理化設計にも重要である。

3.2 動的耐風特性

不等沈下対応モデル（低傾斜角跳ねだし 4 脚支持構造）では、支柱からの張出しが支柱間隔の 1/2 程度と大きいことから、動的耐風安定性が懸念される可能性があった。すなわち、本構造は平板に近い構造であり、揚力勾配 ($dC_L/d\alpha$) が大きいことから、ガスト応答（強風時の風の乱れによる揺れ）の確認のため、固有値解析、風洞実験を実施したものである。

まず、固有値解析を実施した結果、一次振動モードは、アレイ面全体が鉛直たわみの 3.7 Hz であった。

ガスト応答は、動的風洞試験で確認した。使用した風洞試験設備は、静的空気力試験と同じ設備とした。動的風洞模型も同じ縮尺 1/20 とし、弾性パラメータ、重力パラメータを相似させた模型を製作した。したがって、時間の縮尺

は 4.47 である。気流は格子乱流（乱れ強度 10%）で実施した。パネルの揺れの計測は、高速ビデオカメラにより行ない、上流側パネル端部の揺れを計測し、その r.m.s 値（二乗平均平方根）を算定した。その結果を実機換算した結果を図 2 に示す。これより、想定設計風速を上回る 40 m/s でも r.m.s 値で 10 mm 以下と極めて小さい揺れであることがわかる。高さ 10 m 以下の気流条件、PV パネルの許容値が必ずしも明確ではないものの、今回の実験結果は動的安定性が設計上クリティカルにならないことを示すものと判断される。

なお、軽量モデルについても同様の検討を行っており、

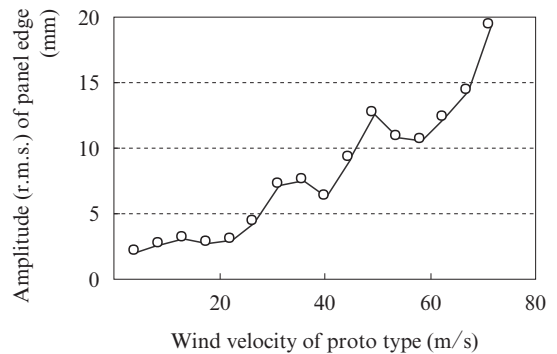


図2 動的風洞実験結果

Fig. 2 Results of dynamic wind tunnel tests

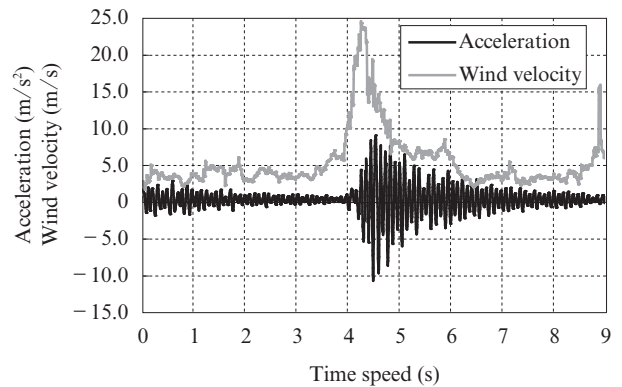


図3 風速および端部根太先端部（上端）の応答加速度

Fig. 3 Wind velocity and acceleration of joist tip

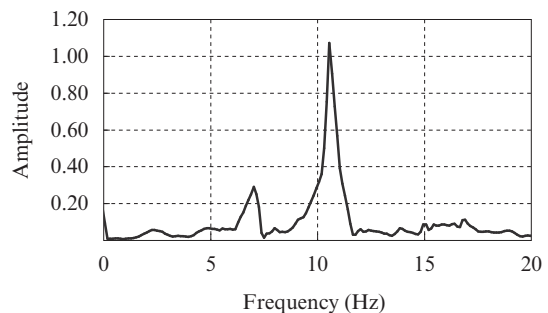


図4 端部根太先端部（上端）の周波数応答

Fig. 4 Frequency response of joist tip

固有値解析での一次振動モードは、アレイ面全体の鉛直たわみの 6.0 Hz であった。Thlnk 地区に建設した実機の測定結果とも一致しており、台風時の状況観測結果も合わせ、耐風性能に問題ないことを確認している。参考に、2012 年 9 月 30 日の台風時（最大瞬間風速 24.5 m/s 風向：西）の風速および端部根太先端部（上端）の応答加速度を図 3 に、周波数応答を図 4 に示す。応答加速度は最大で 10 m/s^2 であり、卓越周波数 11 Hz から振幅換算すると 2 mm 程度であり、問題ないレベルであることが確認された。

4. おわりに

本報では、JFE ソーラーアレイ™ シリーズの特徴と、技術的検討の一部として耐風振動特性について概要を述べた。

JFE ソーラーアレイ™ シリーズは、部材合理化、設置効率向上のために、独自の低傾斜角 4 脚跳ねだし構造を基本構造とした。低傾斜角化にともなう作用風力の検証をはじめとした耐風性能評価、新接合部構造の性能評価等、構造安定性、長期耐用性について独自に検証を実施してその安全性を評価した。とりわけ、耐風振動特性の評価は、数値解析のほか、形状を詳細に再現した独自の風洞実験などによって、風力係数がさらに低減可能であること、動的安全性についても問題ないことなどを示した。

さらに、不等沈下対応のための沈降応力緩和機構、架台組立て合理化のための最適設計、基礎のプレファブ化、そして耐久性低下抑制技術の導入などの高付加価値化、差別化技術についても、すべての機能について、模型実験、実機試験などで検証を行なったものである。

現在のフラッグシップモデルである「軽量モデル」は、これらの技術ノウハウを結集したもので、構造性能を損なうことなく、 40 kg/kW を下回るまでの軽量化、部材製作・施工合理化などによる大幅な低コスト化を実現したことが評価され、2012 年度には、およそ 20 MW の受注を果たしている。

今後も必要な改良やオプション機能を付加して、市場の

ニーズによりマッチしたシステムを構築していくとともに、低炭素化社会の実現に向けた技術開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 内閣府. 低炭素社会づくり行動計画. 2008-07.
- 2) 経済産業省ほか. 太陽光発電の導入拡大のためのアクションプラン. 2008-11.
- 3) 経済産業省. 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会（第 33 回）配付資料. 2009-02.
- 4) 電気事業連合会.
http://www.fepc.or.jp/environment/new_energy/megasolar/index.html
- 5) 日刊工業新聞. 2012 年 5 月 30 日付 1 面.
- 6) JFE スチールのグループ力を結集した産業用太陽光発電システム. JFE 技報. 2013, no. 32, p. 98.
- 7) たとえば, シャープ. 大越泰. 太陽電池アレイ及びその設置構造. 特開 2010-98241. 2010-04-30.
- 8) たとえば, 東芝プラントシステム, 東芝. 叶野誠, 大和田晃司. 太陽電池基礎ブロック, 太陽電池アレイ及び太陽電池システム. 特開 2012-253174. 2012-12-20.
- 9) 河原一雄. 太陽光発電用架台の開発. 旭電機技報. 2002-12, no. 31.
- 10) 日本工業標準調査会標準部会. 太陽電池アレイ用支持物設計標準. JIS C 8955-2004.
- 11) 日本工業標準調査会標準部会. 太陽電池アレイ用支持物設計標準. JIS C 8955 : 2011.
- 12) 木村吉郎, 小林平, 梶原慎介, 加藤九州男, 久保喜延, 日高英介, 池田博嗣. 太陽光発電用ソーラーパネルの配置の影響により生じる基本的な風力係数の特性. 構造工学論文集. 2011-03, vol. 57A, p. 592-598.
- 13) 井上大輔, 勝地弘, 山田均, 西尾真由子, 河井良道, 田中浩史. 風洞実験によるソーラーパネルに作用する風荷重計測. 土木学会第 67 回年次学術講演会. 2012-09, p. 631-632.



坂本 義仁



村上 琢哉



安田 博和