

高次精度LESによるメガソーラー発電所アレイの風圧荷重解析

Wind Flow Simulation around Mega Solar Power Generation System Arrays to Predict Flow-Induced Lift Force Based on High-Order LES Turbulence Model

神保 智彦

デバシス ビスワス

新井本 武士

■JIMBO Tomohiko

■Debasish BISWAS

■NIIMOTO Takeshi

近年、環境負荷低減のために再生可能エネルギーの導入が進められており、その一つとして、大規模な太陽光発電所であるメガソーラー発電所の建設も活発に行われている。メガソーラー発電所では多数の太陽電池パネルを並べ、このときパネルを支える基礎や架台の安全性と低コスト化が重要な課題となっている。メガソーラー発電所では全体を模擬した実験が困難なため、数値解析による予測手法の確立が求められている。

東芝はこうした要求に応えるために、高次精度LES (Large Eddy Simulation) に基づく流体解析技術を適用して、基礎や架台の設計の重要な要素である風力係数を、解析によって予測する手法を開発した。予測の結果は基礎的な実験と良好に一致し、アレイ周りの流れの様相を可視化した。この解析手法により、安全性と低コスト化の両立を期待できる。

In recent years, expectations have been focused on more effective use of renewable energy sources to reduce the burden on the environment. In particular, the introduction of large-capacity photovoltaic (PV) power generation systems, known as mega solar systems, is expanding. In a mega solar system, a large number of PV panels are arranged in arrays facing the sun. It is important to reduce the costs of the system's supporters and substructures, which mainly comprise construction costs, as well as to ensure its safety. However, as it is difficult to experiment with a whole mega solar system, the establishment of a prediction technology using numerical simulation is required.

Toshiba has developed a prediction technology to estimate the pressure load, which is one of the key factors in designing supporters and substructures, applying numerical simulation based on a high-order large eddy simulation (LES) turbulence model for flow-induced lift force. We have confirmed that the wind-force coefficient predicted by this technology agrees well with experimentally obtained results, and that the flow around PV arrays can be visualized for various PV array arrangements. The newly developed technology makes it possible to both reduce construction costs and enhance safety.

1 まえがき

再生可能エネルギーへの関心が高まるなか、太陽光発電所の建設が進められ、なかでも出力1 MW以上の大規模な太陽光発電所はメガソーラー発電所と呼ばれている。メガソーラー発電所では多数の太陽電池パネルが配置され、これらが太陽に向けて支持固定される。メガソーラー発電所は運転時の燃料費が不要であり、保守管理費用も比較的小さいため、その事業採算性は初期コストで決まると言われている。そこで、価格競争で優位に立っていくためには、システム全体の費用の半分程度を占めるとされる、太陽電池パネルを多数並べて配線した太陽電池アレイ（以下、アレイと略記）に対して、安全性を確保するとともに低コスト化を実現することが重要な課題となっている。

アレイ支持物の設計法を規定するJIS C8955（日本工業規格 C8955）¹⁾ではアレイを設計する際に支持物に加わる荷重として、モジュールや支持物の質量による固定荷重、風圧力による風圧荷重、パネル表面の積雪による積雪荷重、及び地震力による地震荷重の4種類を想定している。その中で、支配的になる荷重は設置環境によって異なる。例えば、一般的な場

所であれば固定荷重と風圧荷重、豪雪地帯なら更に積雪荷重を考慮する必要がある。このため、発電所の環境ごとに詳細設計が必要になる。特に、ここで対象としている風圧荷重は、多くのメガソーラー発電所で考慮しなければならない重要な荷重である。

風圧荷重は風によって生じる圧力と風力係数の積で表される。風力係数に関してJIS C8955では、「架台が複数の場合には、周囲端部は近似式の値を、中央部は近似式の値の1/2を使用してもよい」と規定している。しかし、中央部は明確に定義されておらず、更に、アレイの間隔や高さの影響については未検討で、また、近似式はパネルの仰角15°～45°の範囲だけで定義されている。

そのため、基礎、架台の設計時には様々なアレイ配列に対して、風力係数を周囲端部の1/2としてよい領域を見積もることが重要になる。メガソーラー発電所では一部を模擬した試験は可能であるが、全体を模擬した試験は規模上困難である。更に、アレイの設置環境や配列は各々の発電所ごとに異なるため、信頼性のある結果を得るには、地形や、季節、天候などの設置環境を考慮しなければならない。これらのことから、数値流体解析による風力係数の予測手法の確立が求められ

ている。

今回東芝は、高次精度LES (Large Eddy Simulation)^{(2), (3)}をコアとする数値解析技術をアレイ周りの流れに適用し、風力係数分布を見積もるとともに流れの様相を可視化した。得られた知見をアレイ設計に利用することを目的としている。

ここでは、高精度流体解析技術の概要、解析結果を実験結果と比べてモデルの妥当性を検証した結果、及び基本的なアレイ配列周りの流れを検討した結果について述べる。

2 高次精度LESをコアとする高精度流体解析

数値流体力学は一般に空間を格子と呼ばれる小さな領域に分割し、流れの基礎方程式を計算機を用いて解くもので、設計の現場で重要な役割を担い、汎用の流体解析コードも広く使われるようになってきた。しかし、複雑な現象を取り扱ううえで、汎用解析コードではまだ計算精度が不十分なケースもある。ここで対象としているメガソーラー発電所のアレイ周りの流れに対して、正確な風力係数分布を得るためには、数十Pa程度の非常に小さな圧力の変動をとらえて計算しなければならない。

工学的な流れの多くは、規則的な流れである層流から始まり、やがて乱雑で複雑な流れである乱流に遷移する。アレイ周りの流れも乱流となっている。流れの様相を把握するうえで重要な境界層内の層流から乱流への遷移は、圧力こう配などから影響を受けるため、物理現象に基づいた乱流のモデル化が重要である。エネルギーカスケードと呼ばれる大きい渦から小さい渦へエネルギーが伝達及び散逸する過程をどのように扱うかが高精度な乱流モデルのキー技術となる。

LES乱流モデルは、ある大きさ以下の渦だけをモデル化し、それよりも大きい渦は流れの基礎方程式を直接解く方法である。ここで用いている高次精度LESは、最小格子幅、及び壁面近傍の小さい渦と壁面から離れた大きい渦の関係を考慮した渦の間のリンクにより、格子依存性が低く、小さい渦から大きい渦への影響を表現でき、乱流特性を詳細に解析できる。

3 実験との比較による解析モデルの検討

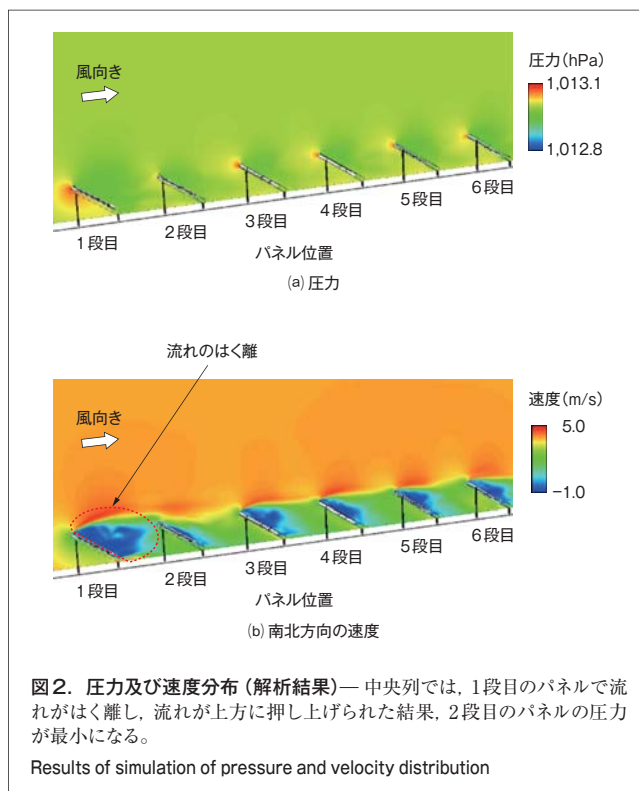
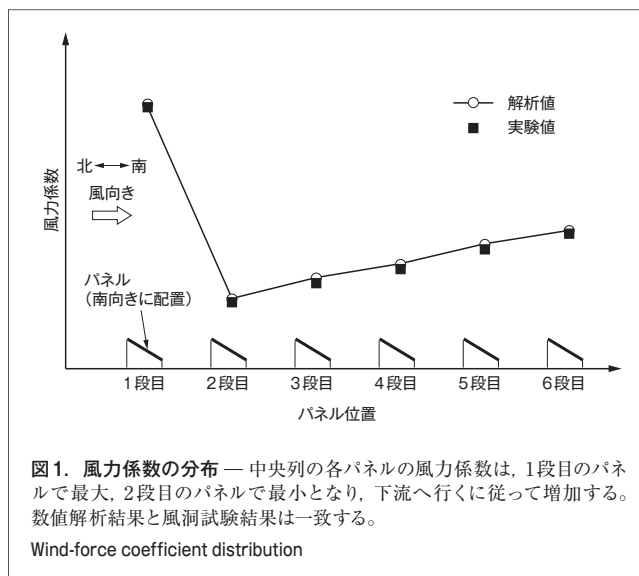
アレイの設計の際に考慮する荷重のなかで、風圧荷重は他の荷重と異なり、各々のアレイごとに差があるのが特徴で、各パネルの風力係数を高精度に見積もることが重要な設計要素となっている。風力係数は、パネルに作用する力をパネル面積及び動圧で規格化したもので、絶対値が大きいほどパネルが受ける力が大きいことを表す。

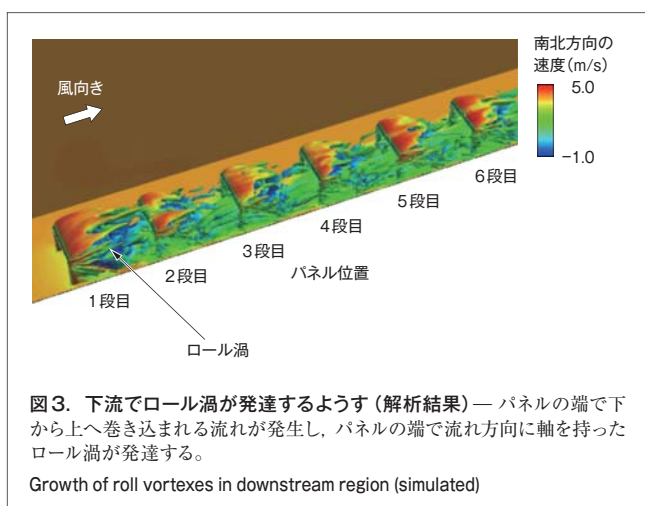
はじめに西条太陽光試験発電所^(注1)の実験モデル⁽⁴⁾ (以下、

(注1) 愛媛県西条市に1981年度から1992年度まで設置されていた、わが国初の太陽光発電試験プラント。

西条モデルと呼ぶ)について解析する。太陽電池パネルは発電効率の観点から国内では一般に南向きに配置される。太陽電池パネルを南北に6段(北側を1段目)、東西に3列並べ、北風を想定したときの中央列パネルの風力係数分布を図1に示す。上流側にある1段目のパネルで最大、2段目のパネルで最小となり、その後下流へ行くに従って増加する傾向が得られ、数値解析結果と風洞試験結果⁽⁴⁾が定量的に一致している。

中央列パネル周りの圧力及び速度分布に対する数値解析結果(時間平均値)を図2に示す。図2(a)に示すパネル中央断





面における圧力分布から、1段目のパネルの上下面で圧力差が最大、2段目のパネルで最小となり、その後下流へ行くに従って増加していることがわかる。これは図1に示す各パネルの風力係数と同様の分布である。また、図2(b)に示すパネル中央断面における南北方向の速度分布から、1段目のパネルで流れがはく離して上方に押し上げられ、1段目と2段目のパネル間には流入せず、2段目と3段目のパネル間で降から少しずつ流入していることがわかる。その結果、図1に示すような風力係数の分布が得られたと考えられる。

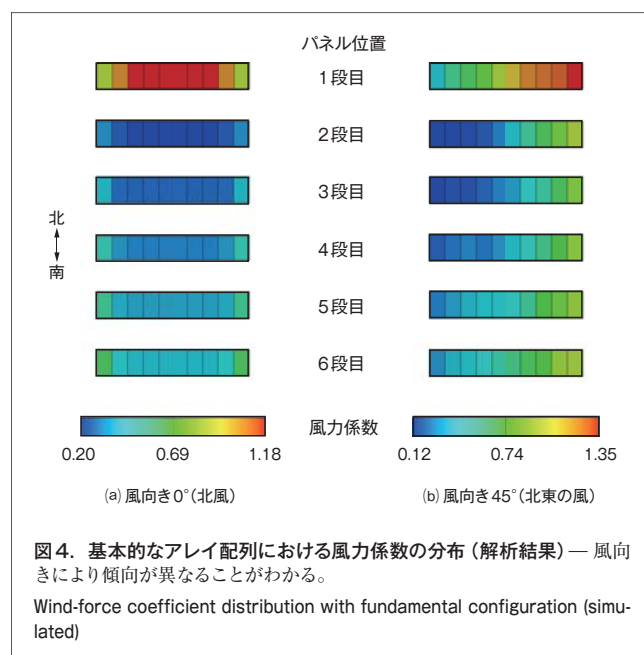
更に、圧力はパネル下面で高く、上面で低くなっている (図2(a)) ため、パネルの端では下から上へ巻き込まれる流れが発生する。その結果、パネルの端で流れ方向に軸を持ったロール渦が発達する (図3)。下流では発達したロール渦の影響で流路が狭くなり、流れが中央に集中して加速する。そのため、パネル上面の圧力は低下し、相対的に下面との差が大きくなり、下流側のパネルの風力係数は増加する。また、下流側では端のパネルが受ける風圧はロール渦の影響によって中央のパネルよりも大きくなると考えられる。

また図2(a)から、1,012.8~1,013.1 h (ヘクト:10²) Paのわずか30 Pa程度の圧力の変動をきちんと捉えて計算できていることがわかる。

4 基本的なアレイ配列における流れの様相

次に基本的なアレイ配列として、南北方向に6段、東西方向に10列並べたアレイで、風向き0° (北風) 及び45° (北東の風) の条件のもとで流れの様相を解析した。

各パネルの風力係数の分布を図4に示す。風向き0° の場合 (図4(a)) は、上流側である1段目のアレイで最大、2段目で最小となり、その後下流へ行くに従って増加しており、西条モデルと同様の傾向である。また、同じ段においては、2段目以降では中央部の列よりも端列のほうが大きいものに対して、1段目



では端列のほうが小さくなっている。風向き45° の場合 (図4(b)) は、上流側である1段目の10列目 (西側を1列目とする) のパネルで最大、3段目1列目のパネルで最小になっている。

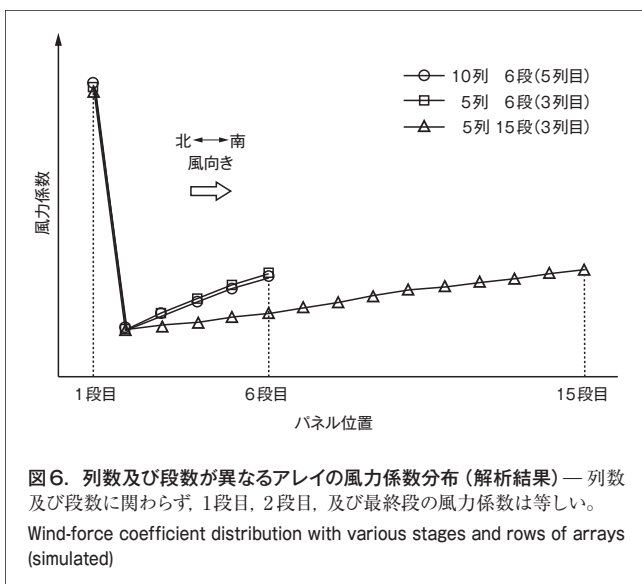
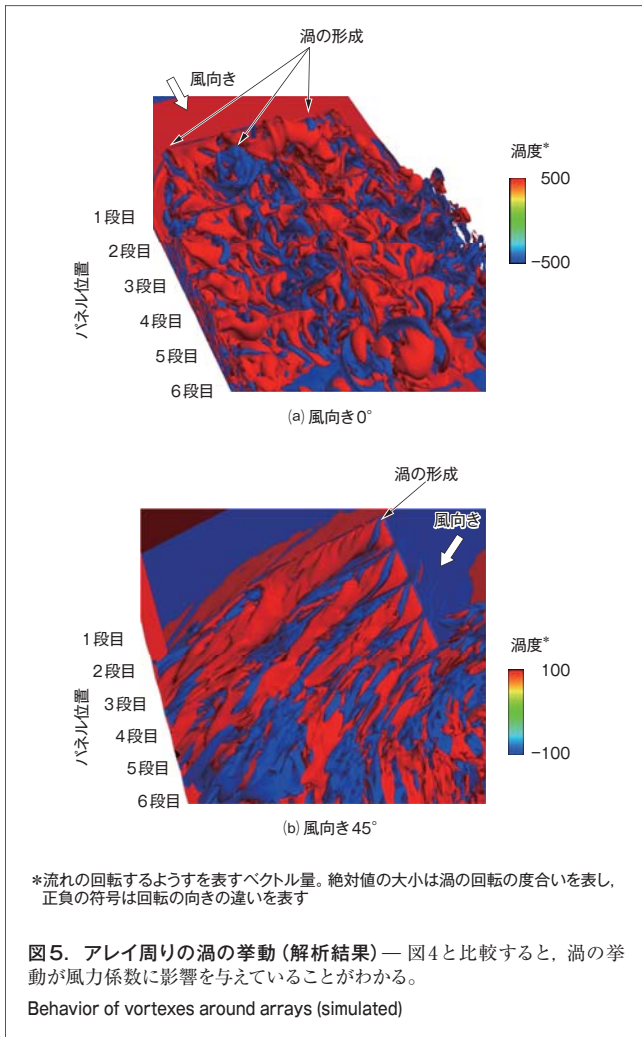
風向き0° 及び45° における渦の挙動を図5に示す。

風向き0° の場合 (図5(a)) は、アレイの両端及び中央で大きな渦の形成が見られ、下流に向かって伸びている。西条モデルと同様に、パネルの上下面の圧力差によりパネルの両端で下から上へ巻き込まれる流れが発生することで、パネルの端でロール渦が発達して、下流では流れがパネル中央に集中することで加速する。その結果、図4(a)に示したように、端列の風力係数が1段目では中央部の列よりも小さく、2段目以降では中央部よりも大きくなったと考えられる。また、風力係数が1段目で最大、2段目で最小となり、その後下流へ行くに従って増加するのは、流れが1段目ではく離して上方に押し上げられ、2段目には流入せず、3段目以降で徐々にアレイ間に流入しているためと考えられる。

風向き45° の場合 (図5(b)) は、各段のアレイの上流側の角部から渦の形成が見られ、アレイ中央部に向かって伸びている。このように渦の挙動が風力係数に影響を与えていると考えられる。

風向き0° のときの風力係数は、図1に示したように1段目のアレイで最大、2段目で最小となり、その後下流へ行くに従って増加する傾向となった。ここでアレイの段数が風力係数分布に与える影響について検討した。アレイ配列を10列6段、5列6段、及び5列15段とした場合の、中央列付近におけるパネルの風力係数分布を図6に示す。

段数が同じで列数が異なるとき、中央列付近の風力係数は一致した。段数を6段から15段に増やしたときも同様の傾向



が得られた。また、1段目と2段目の値は3ケースとも一致し、更に、最終段の値も同様に3ケースとも一致している。これは、1段目のアレイではく離れた流れが、3段目以降から徐々に流入し、最終的にアレイの段数に関わらず最終段の後方で降りてくるためと考えられる。

5 あとがき

高次精度LESによる流体解析手法を構築し、メガソーラー発電所アレイ周りの流れに適用した。その結果、実験から得られた風力係数と良好に一致し、解析の妥当性を検証できた。また、流れの様相を可視化することによって、パネル端部で発生する渦の挙動を把握した。

この手法を用いることで様々なアレイ配列における風力係数分布を予測できるようになり、設計に反映することで、安全性と低コスト化の両立を期待できる。

文献

- (1) JIS C8955 : 2011. 太陽電池アレイ用支持物設計標準.
- (2) Biswas, D. "Studies on Unsteady Laminar- Turbulent Transition in a Low Pressure Turbine Flow Based on a Higher order LES Model". 36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. San Francisco, CA, USA, 2006-06, AIAA. 2006, AIAA- 2006-2881.
- (3) Biswas, D. "Studies on Separation Control CFD Validation Test Case Based on a Hybrid Order LES Model". 36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. San Francisco, CA, USA, 2006-06, AIAA. 2006, AIAA- 2006-3684.
- (4) 浮田和明 他. 西条太陽光試験発電所-太陽電池架台の設計に関する一考察-. 電力土木. 197, 1985, p.98 - 115.



神保 智彦 JIMBO Tomohiko, D.Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務、博士 (工学)。流体解析技術に関する研究・開発に従事。日本機械学会会員。

Mechanical Systems Lab.



デバシス ビスワス Debasish BISWAS, D.Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主幹、工博。電子機器及びエネルギー機器の研究・開発に従事。日本機械学会、AIAA会員。

Mechanical Systems Lab.



新井本 武士 NIIMOTO Takeshi

社会インフラシステム社 電力流通システム事業部 太陽光発電システム推進部主務。大規模太陽光発電システムのエンジニアリング業務に従事。

Transmission & Distribution Systems Div.