

太陽光パネルを設置した建築物に関する流体解析

Flow Simulation around a Building with Solar Panels

- 竹森 啓真, 東海大, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1, 5BMKM047@mail.u-tokai.ac.jp
- 梶原 鷹典, 東海大, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1, 2BED1213@mail.tokai-u.jp
- 滝沢 一樹, 東海大, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1, 2BED3216@mail.tokai-u.jp,
- 高橋 俊, 東海大, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1, takahasi@tokai-u.jp
- Hiromasa TAKEMORI, Tokai Univ., Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 JAPAN
- Yosuke KAJIWARA, Tokai Univ., Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 JAPAN
- Kazuki TAKIZAWA, Tokai Univ., Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 JAPAN
- Shun TAKAHASHI, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 JAPAN

For safely solar panel installation, it is significant to evaluate various loads, such as snow or wind. The estimation of the wind load of aerodynamic force is generally conducted by wind tunnel experiments to satisfy the safety standards based on the Building Standards Act or Japan Industrial Standard. However, it is not well known how these standards can predict real aerodynamic force for real installed solar panels. Therefore, this study is devoted to investigate the aerodynamic force for the panels on house roofs by using numerical simulation of commercial software. Three kind of hip roofs which are popular roofs in Japan are simulated in this study. The detailed phenomenon is investigated by surface pressure distribution obtained by the simulation.

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震の影響により東日本大震災が起こった。それにより生じた福島第一原子力発電所の事故に伴い原子力発電所の危険性が物議を醸しだした。その後、日本国内の原子力発電所の稼働が停止されるなど日本国内の電力の発電方法が見直された。その影響により、東日本への電力の供給が危ぶまれた。実際に、関東圏では計画停電という形で節電も行われ、深刻な電力不足に悩まされた¹⁾。現在、九州で川内原子力発電所が再稼働を始めたが、それ以外の原子力発電所はまだ休止しており、それが原因で電気料金が高騰している為、早急に原子力発電に代わる新しい発電方法が求められている。そこで、再生可能エネルギーを利用する発電方法が注目を集めており、その中でも各家庭でも電気を発電し利用することが可能なソーラーパネルを一般家屋の屋根に設置しそれらに当たる太陽光を電力に変換する太陽光発電が急速に社会に広がりつつある。昨今では日本の企業でも広大な空き地や埋立地に大量のソーラーパネルを並列設置し大量の電気を発電する事が可能なメガソーラーという施設の開発を行う企業が増加している²⁾。これらの方法により電力を補っていく事は可能だが、それと同時に設置件数の増加に伴い事故の発生率も上昇する。ソーラーパネルを設置する際の許容応力については建築基準法に記載されている数値以上にする事で安全性を持たせているが、その数値の妥当性については未だに議論されている。その理由の一つは、ソーラーパネルに関する流体力学的な研究が進んでいないことにある。ソーラーパネルを搭載した家屋を実寸法で風洞実験を行うには大きなコストとなる。そこで、本研究では一般家屋に設置されたソーラーパネルに対して周囲の風が与える空気力をCFD(Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学)により予測する。本研究では市販の流体解析ソフト ANSYS Fluent による CFD を用いて、屋根勾配を変化させた際のパネルに加わる空気力を求め、その結果に対してどのような対処を行えばソーラーパネルによる事故の危険性を低減できるかを考察することが目的である。

2. 計算手法

本研究では商用ソルバの ANSYS Fluent を使用して解析を行う。支配方程式は 3 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式である。計算格

子にはハイブリッド非構造格子を用いる。解法には SIMPLE 法を使用し、時間積分、対流項差分、粘性項差分はそれぞれ一次精度 Euler 陰解法、二次精度風上差分法、二次精度中心差分法を使用し解析を行った。また、今回の解析では乱流モデルに $k-\omega$ SST モデルを使用した。

3. パネルの設置していない建築物モデルによる解析

3.1 計算条件

初めに、建築物に対してどのような角度で風が当たった際に屋根面に対して大きな揚抗力が発生するのかをパネルを搭載していない建築物モデルにて解析を行い求める。今回は西村, Xu, Ahmad³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾らの論文と比較を行い比較検証する。モデル形状及び解析領域については Fig.1 に示す。モデル寸法は縦, 横, 幅それぞれ 200×400×150(mm), 解析領域は縦, 横, 幅それぞれ 2000×4000×750(mm)に設定し解析を行った。解析格子の概要及び計算条件については, Table1 に示す。

Table 1 Parameters for mesh and computation

| Roof angle | Wind angle | Inflow vel. (m/s) | Minimum grid size (mm) | Prismatic layer | Total Nodes | Total Elements |
|------------|------------|-------------------|------------------------|-----------------|-------------|----------------|
| 10° | 30° | 10.8 | 0.12 | 15 | 5,629,040 | 13,088,895 |
| 20° | 45° | 10.8 | 0.12 | 15 | 5,991,521 | 13,812,359 |

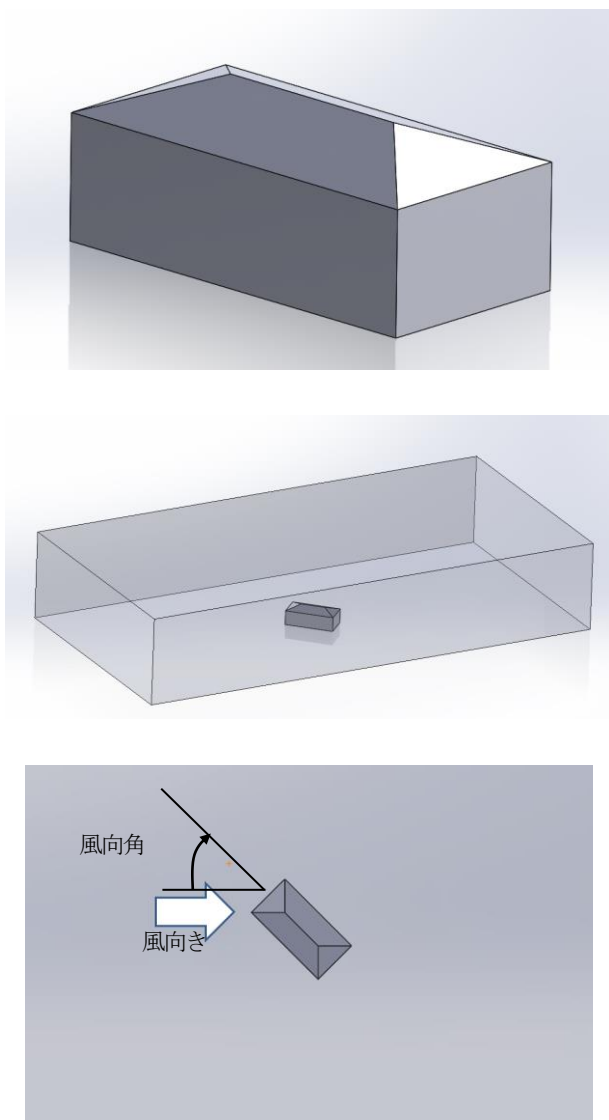


Fig. 1 Computational domain around a present house model
(top: close view, middle: far view, bottom: wind angle)

3. 2 計算結果

解析で得られた屋根表面の圧力係数分布を Fig. 2 に示す。上記の実験⁹⁾と解析の可視化図を比較したところ屋根面の風上側の先端にて強い低圧が観測されるといった点や、等圧力線図が同様の傾向を示していることから参考文献⁹⁾と解析でよく似た傾向が得られたと言える。また、この計算により最も低圧が出やすい風向角はおよそ 30°よりも 45°付近の方と考えられる。そこで、次に行う屋根勾配を変化させ圧力の違いを観測する解析では風向角を 45°に設定する。

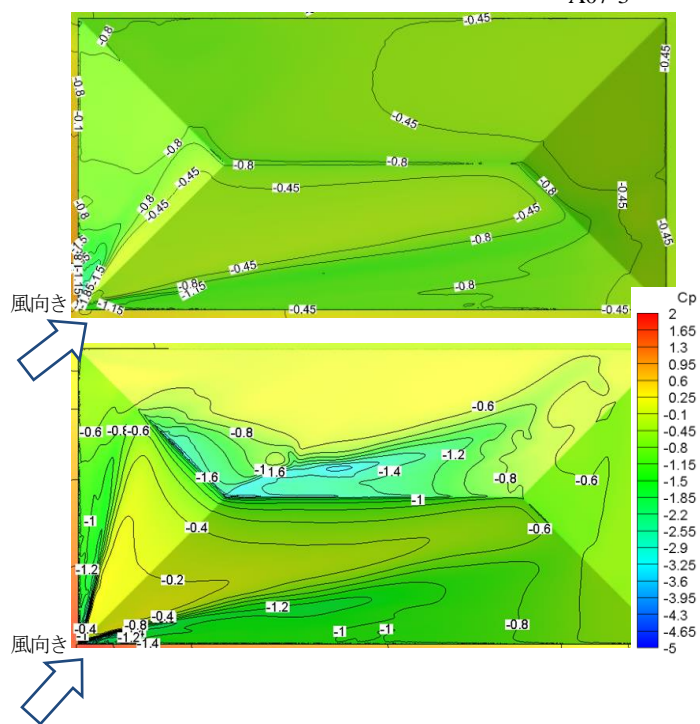


Fig. 2 Cp distributions on roofs (Roof Angle 10°, 20°)

4. パネルを設置したモデルでの解析

4. 1 計算条件

前述の解析と同様の屋根勾配にてパネルを設置したモデルの解析を行う。パネルを設置した解析モデルを Fig. 3 に示す。

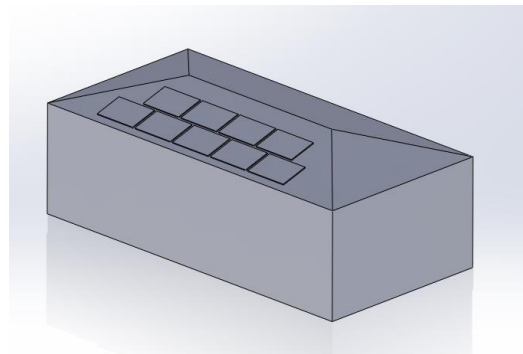


Fig. 3 House model with solar panel models

解析条件については、前述の通り最も屋根面に大きな負圧が生じていた風向角 45°とし、また建築物モデルの向きに関してはパネルが風下側になるように設置し、解析を行った。本解析の格子生成パラメータについては以下の Table 2 に記す。また、計算条件に関しても前述の解析と同様の設定にて行った。格子生成後のモデルの図を以下の Figs. 4-6 に示す。

Table 2 Parameter for mesh and computation

| Roof angle | Wind angle | Inflow vel. (m/s) | Minimum grid size (mm) | Prismatic layer | Total Nodes | Total Elements |
|------------|------------|-------------------|------------------------|-----------------|-------------|----------------|
| 16.7° | 45° | 10.8 | 0.12 | 15 | 5,629,040 | 13,088,895 |
| 26.5° | 45° | 10.8 | 0.12 | 15 | 5,991,521 | 13,812,359 |
| 35.0° | 45° | 10.8 | 0.12 | 15 | 5,587,609 | 13,013,848 |

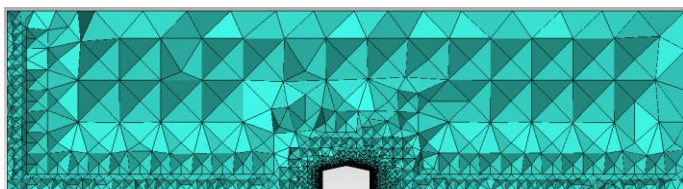


Fig. 4 Mesh distribution in whole domain

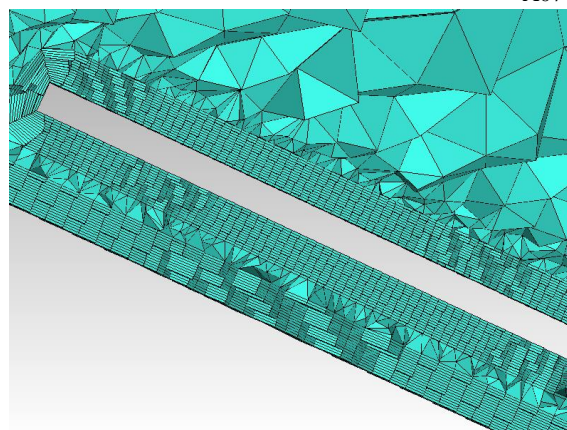


Fig. 6 Prismatic layers around panel and roof

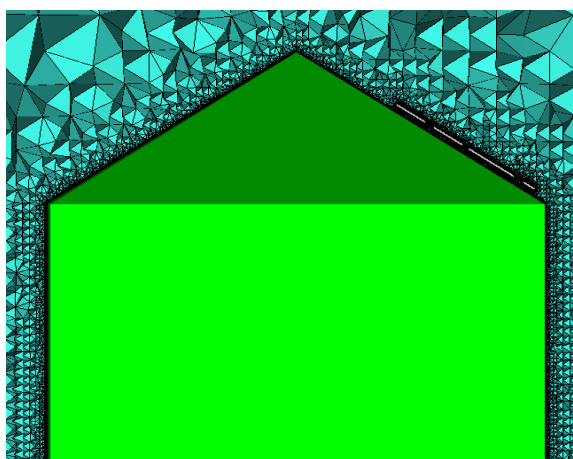
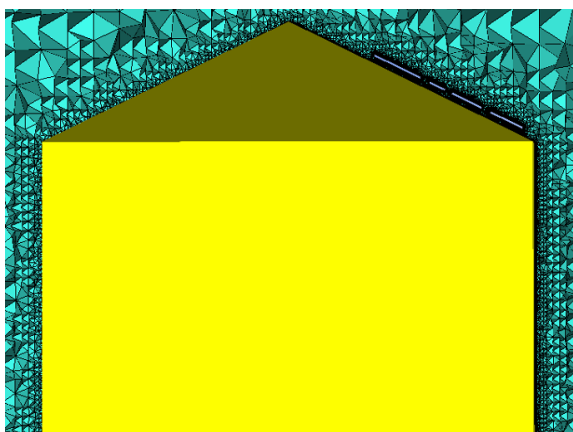
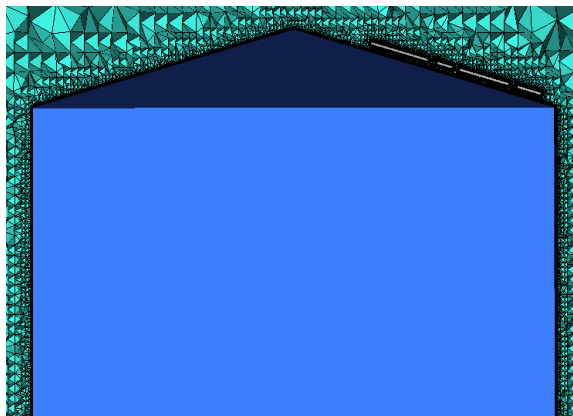


Fig.5 Mesh distribution around model
(16.7deg, 26.5deg, 35.0deg)

4. 2 計算結果

屋根勾配 3 寸, 5 寸, 7 寸 (16.7°, 26.5°, 35.0°) の際の計算結果を以下の Fig. 7 に示す. 先程の Fig. 2 の屋根勾配 10° の可視化図と比較すると, 等圧線分布に明確な差が見られ, 特に屋根勾配が 3 寸と 5 寸の際には低圧の部分が細かく分かれており, 局所的に強い低圧部が見られる. また, 上記の結果をみると屋根勾配 3 寸と 5 寸の際に圧力分布が同様の傾向を示している. しかし, 屋根上部で最も低い圧力の点を含んでいるのは屋根勾配が 3 寸の際の計算結果である. 7 寸の際には他の屋根勾配と違いパネルが設置されている屋根面には強い低圧は発生していない.

また, それぞれのパネルに加わる揚抗力を比較する為に下記の Fig. 8 のようにパネル毎にナンバリングして, パネル毎の揚抗力を測定して比較を行う. なお, 屋根勾配が変化してもパネルの並びは変わらない為 3 パターン全て同様の数字に設定した. 屋根勾配ごとにそれぞれのパネルに加わるある瞬間の揚力係数を比較したグラフを Fig. 9 に, 抗力係数を比較したものを Fig. 10 に示す. この揚力係数および抗力係数は標準大気密度, 一樣流速から求めた基準動圧, パネル 1 枚の最大投影面積 (本解析では約 $1.5 \times 10^3 \text{m}^2$) を基準面積として求めている. Fig. 9 から屋根勾配 3 寸の際にはパネルごとに正負の揚力に分かれて生じているのが見られる. これは屋根勾配が 3 寸などの低い傾斜角の際には流れが屋根頂部で大きく剥離せず, 比較的屋根面に沿って流れていき, パネルと屋根面の隙間に流れ込むことで生じたものと思われる. また特に 6 番のパネルで負の揚力が観測されたのはその付近に剥離点が生じたことが原因だと考えられる. この 3 寸の結果の中で最も揚力が大きいのは 1 と 7 のパネルであるが設置の観点からは 5, 6, 7 の間で揚力の変化が大きい事が問題と思われる. この現象には屋根頭頂部での負圧部から剥離した円錐渦による影響が考えられる. しかしながら屋根頂部に近い 2, 3 番のパネルでは剥離渦の関係も疑われるものの Fig. 9 では負の揚力が生じていることが確認でき, これがなぜ生じたのか, また瞬間的なものなのかどうか, さらに他のパネルに生じる揚力との関連性については現在調査を進めている.

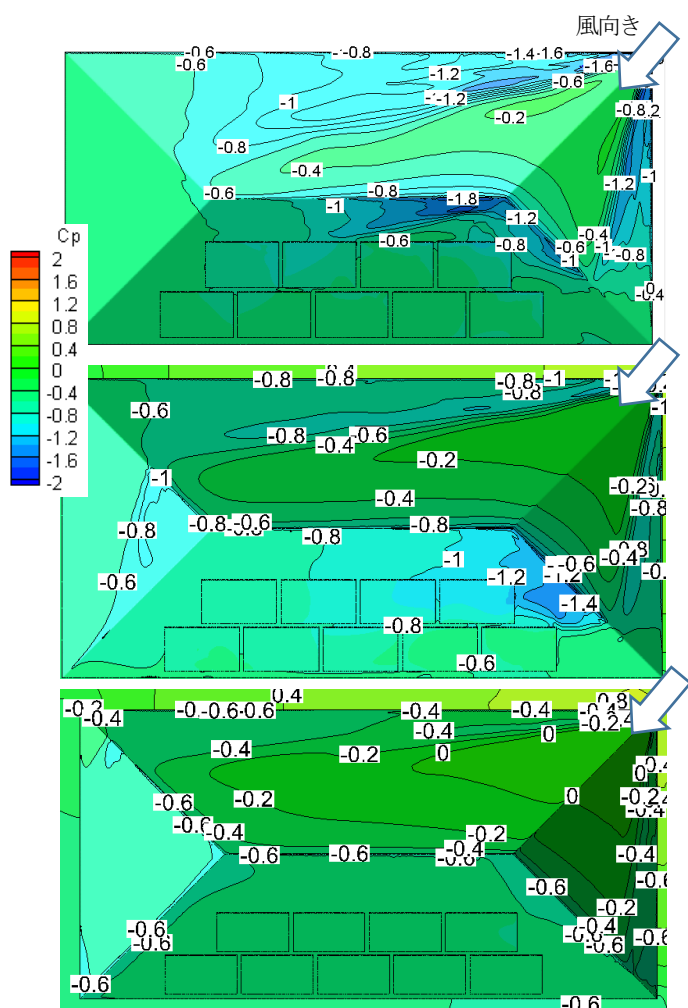


Fig. 7 Cp distribution on roof and panels
(top:16.7deg, middle:26.5deg, bottom:35.0deg)



Fig. 8 Panel number

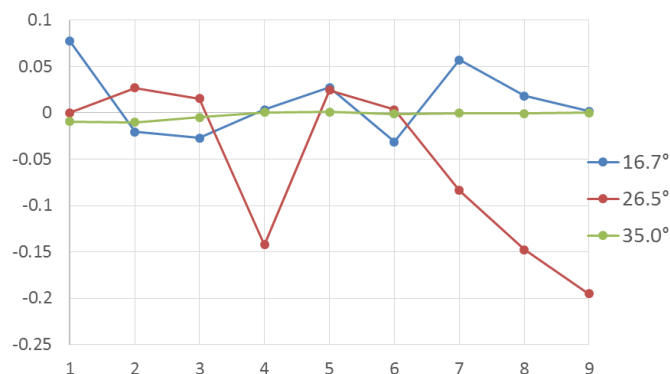


Fig.9 Lift coefficient for panels

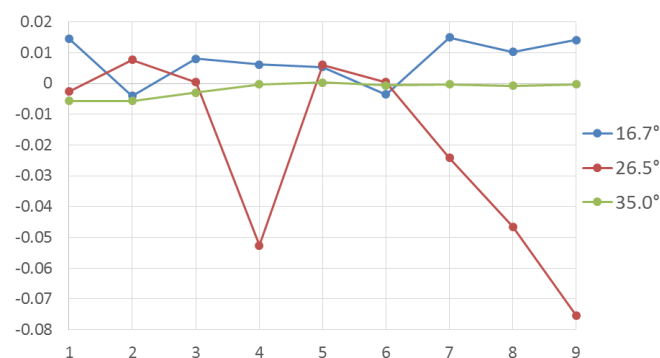


Fig. 10 Drag coefficients for panels

一方で、屋根勾配5寸の際は7番以降で負の揚力を生じているパネルが確認でき、特に4番と9番に最も低い数値が見取れる。屋根勾配3寸の場合と同様に、屋根頂部に近い4と9のパネルに負揚力が生じるのは、剥離渦との関連が考えられ、屋根上部から剥離した渦が発達し尚且つパネル近傍に存在しているために生じたと考えられる。しかしながらこれは、パネルを搭載していないモデルで見られた負圧領域では、パネルを搭載すると負の揚力(正圧)方向の力が生じることを示唆しており、設計指針としては逆の方向を指定していることになる。この点については流れの非定常性、ピーク風圧係数、流れ場構造との比較をより詳細に行う必要がある。

また一方で、屋根勾配が7寸の際には圧力分布が非常に狭い範囲となった。これは屋根勾配の増加により流れの剥離点がパネルの手前に生じ、パネル近傍の圧力変化に関与していない為だと思われる。

次に速度から考察を行うために Fig. 11 にパネル4番、パネル8番、パネル9番近傍の速度分布を示す。屋根勾配16.7°の際にパネルと屋根の間に青色の逆流領域が生じているのが見られる。しかしながら他の角度ではこのような流れは見られず、角度による差異が確認できる。屋根勾配5寸の速度分布では上部のパネルを覆うように速度が低下した領域が見られ、それに比べるとパネルと屋根面間の速度が上昇している。この速度の上昇により物体同士が引き付けあう作用が生じていると考えられ、それにより負の揚力が生じたと推測される。屋根勾配7寸の速度分布では、パネル近傍で大きな渦が発生しておらずほとんどパネルに影響が見られない。

以上の事から、本研究では風向角が45°の際にパネルに最も悪影響を与える屋根勾配は16.7°、また最も影響がないのは屋根勾配

35.0°という結果となった。今回の解析結果は先行研究⁶⁾と同様の傾向を示している。また、Fig. 11 の 26.5°の際にパネル下部にて速度が上昇している事によりパネルにダウンフォースが発生し屋根面の方向に吸い寄せられていた現象については、今後検討する必要がある。この流れ場は既に剥離渦中の流れであり、このような流れを捉えるには非定常計算が必須であることから、今後は非定常解析を行ってパネルに加わる空気力を詳細に見積もる必要がある。

最後にFig. 12に4番のパネルの前方とパネル上に発生している渦をCpの値が-1.03の等値面から可視化した図を示す。この可視化図より、屋根頂部で生じたこの低圧部(渦)が定常的に存在している可能性が考えられる。4番のパネルがその渦に触れる形になっており、この影響でパネルに揚力が生じることが考えられる。

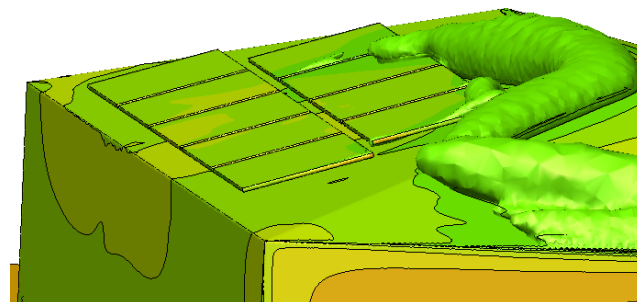


Fig. 12 Cp isosurface (Roof angle 16.7°)

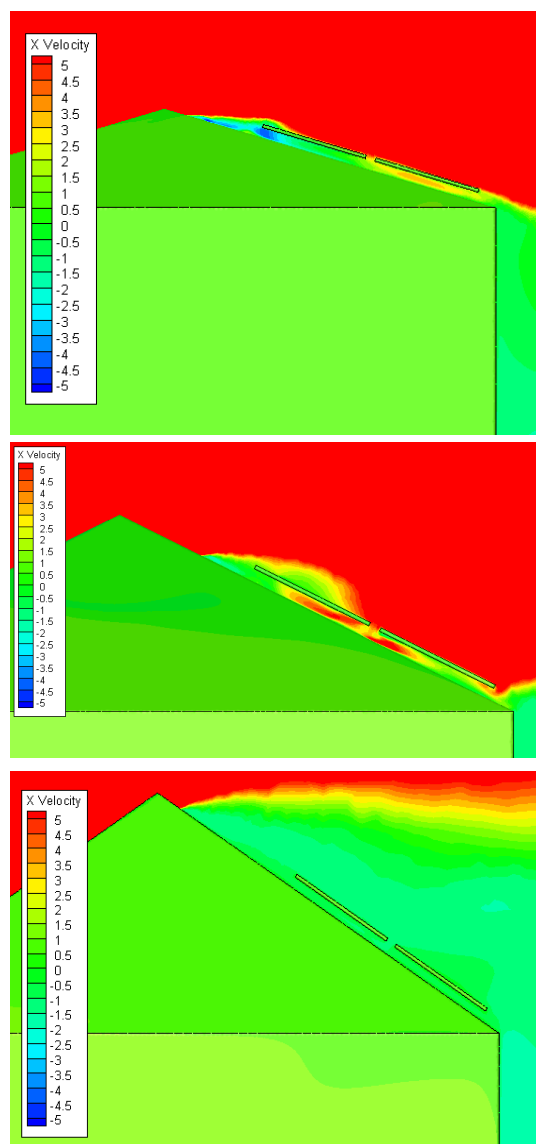


Fig. 11 Velocity Map (16.7°, 26.5°, 35.0°)

5. 結言

商用流体解析ソフトの ANSYS Fluent を使用して解析を行い、太陽光パネルを搭載した家屋模型に対する空力解析を実施した。本研究では日本家屋に多いと言われる 3 寸(16.7°)、5 寸(26.5°)、7 寸(35.0°)勾配について解析を実施した。その結果、本解析条件では屋根表面の圧力分布とパネルに生じる圧力係数を考慮すると、屋根勾配が 3 寸(16.7°)の際に最もパネル及び屋根表面に大きな影響を与えられた。今後、この研究を進めていく際には屋根勾配に加え風向角を変更した際の圧力も計測を行う必要があるとともに、パネルの配置なども考慮していくべきである。さらには、本検討ではほぼ全てを RANS による瞬間値で評価しているが、今後は非定常流れでのピークを考える必要もあり、LES による剥離渦の正確な解像と、ピーク値の算出も検討する必要がある。

謝辞

本研究は NEDO プロジェクト「太陽光発電多用途化実証プロジェクト/太陽光発電多用途化実証事業」に係る共同研究より補助を受けて行われている。

参考文献

- (1) 山口 聡, 近藤 かおり, 小寺 正一, "福島第一原発事故とその影響", (2011), pp. 10-11.
- (2) 坂村 圭, 金子 貴俊, 沼田 麻美子, 中井 検裕, "地上設置型メガソーラーの建設地の立地特性に関する研究", (2014), pp. 633-634.
- (3) 高森 浩治, 西村 宏昭, 浅見 理英, 染川 大輔, 相原 知子 "寄棟屋根の外装材設計用風圧係数", (2009), pp. 24-29.
- (4) Y. L. Xu, G. F. Reardon, "Variations of wind pressure on hip roofs with roof pitch", (1998), pp. 274-276.
- (5) Shakeel Ahmad, Krishen Kumar, "Effect of geometry on wind pressures on low-rise hip roof buildings", (2002), pp. 775-76.
- (6) 奥田 泰雄, 中村 修, 岡田 恒, 他 14 名, 建築研究所, "寄棟屋根, バランダ手すり及び屋上広告板等の風力係数の提案", (2013), pp. 5-1 - 5-25