

陸屋根に水平に設置される太陽光発電パネルの風荷重低減効果を利用した環境調和型防水システムの提案

Development of an environmentally harmony type waterproofing system utilizing the wind load reduction effects of photovoltaic panels horizontally installed on flat roofs

佐藤 公亮 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)
植松 康 秋田工業高等専門学校 校長・工博

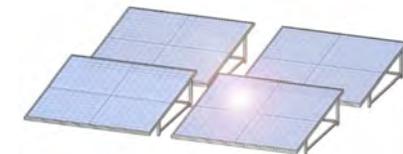
1

本研究の目的

- 機械的固定工法防水システム：有機溶剤の使用量が少ない→**環境配慮型**シートをディスクで**点状に固定**するため、応力集中により強風被害が生じる
- 太陽光発電(PV)システム：CO₂排出量が少ない→**環境配慮型**一般に、屋根面に対して20°から30°の勾配で設置されるが、逆風時の風力が大きくなる。



機械的固定工法防水システム



PVシステム

研究の目的

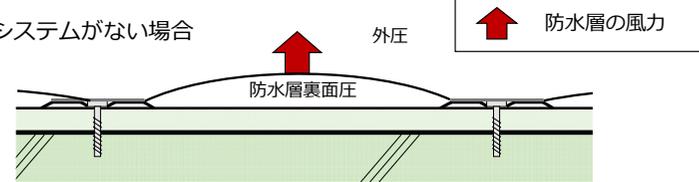
耐風性に問題を抱える防水システム及びPVシステムを組み合わせることで**低コストで耐風性が高く、環境的に優れたシステムを提案する**

2

本システムの特長1

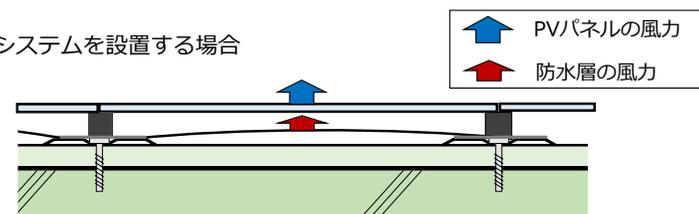
①防水シートの固定ディスクとPVパネルの固定金具を併用

●PVシステムがない場合



システムに作用する全ての風力を防水層が負担

●PVシステムを設置する場合

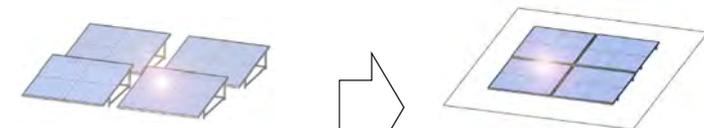


防水層が負担する風力の一部をPVパネルが負担する

3

本システムの特長2

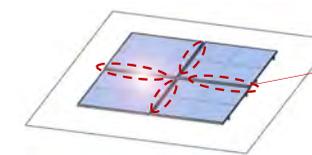
②PVパネルを屋根面に平行に設置することでパネルに作用する風力を低減



傾斜型PVシステム
一般に20°~30°の勾配で設置される。一方、逆風時の風力が大きくなる。

屋根平行型PVシステム
受圧面積を抑え、風力を低減する。構造的に強度を上昇。

③PVパネル間に隙間を設けて「等圧効果」を利用する



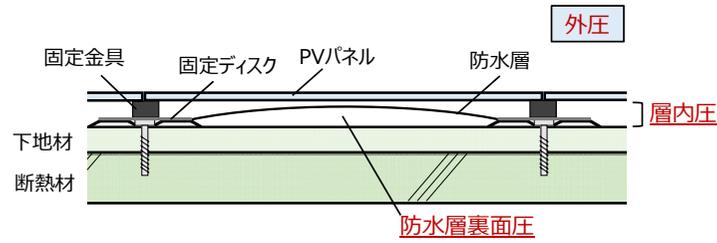
屋根平行型PVシステム

PVパネル間に隙間を設けて、空気の通り道を作り「等圧効果」を利用

PVパネルに作用する風力を低減

4

風荷重低減効果の検証方法



層内圧：PVパネルと防水システム間の圧力

風洞実験

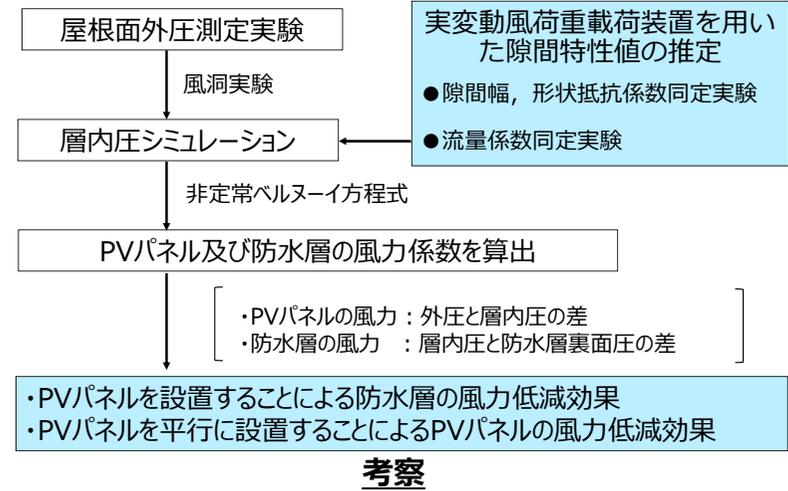
シミュレーション

$$\text{PVパネルの風力係数} = \text{外圧係数} - \text{層内圧係数}$$

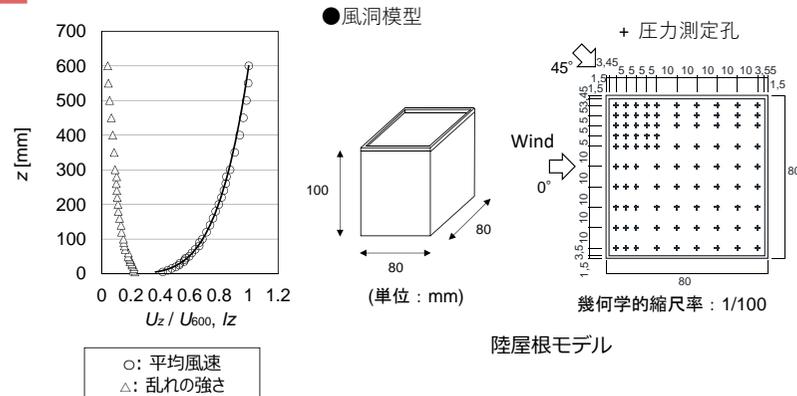
風洞実験によりPVパネル上面の圧力(外圧係数)を求める

実験では求めることができない層内圧は非正常ベルヌーイ方程式を用いたシミュレーションにより求める

研究フロー



実験気流及び対象とする建物(陸屋根モデル)

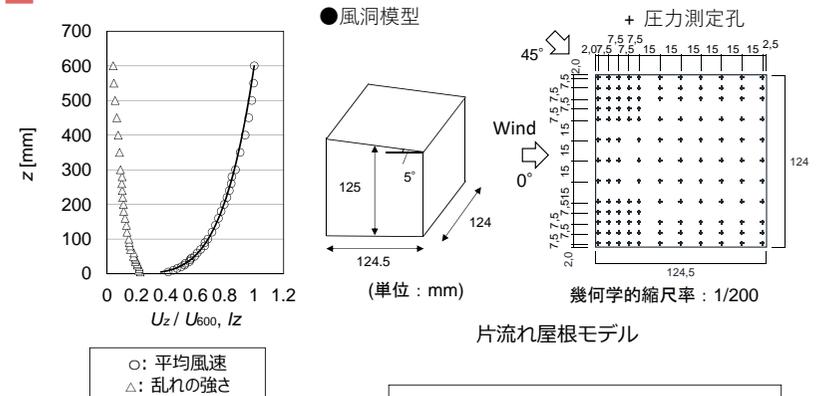


陸屋根モデル

パラペット(厚さ15cm)高さ15cmと30cmの2種類のモデルを想定

風速 (屋根平均高さ)	8 m/s
べき指数	$\alpha=0.21$
サンプリング周波数	800Hz

実験気流及び対象とする建物(片流れ屋根モデル)

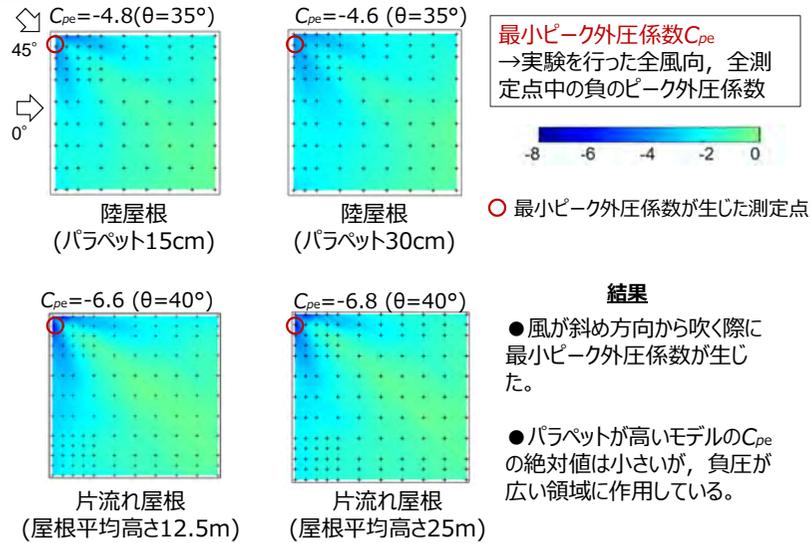


片流れ屋根モデル

屋根平均高さ12.5mと25mの2種類のモデルを想定

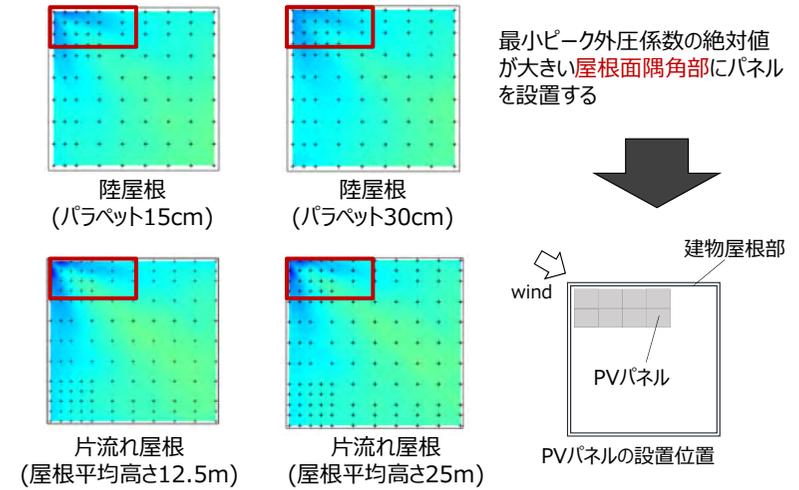
風速 (屋根平均高さ)	8 m/s
べき指数	$\alpha=0.21$
サンプリング周波数	800Hz

最小ピーク外圧係数が生じたときの圧力分布



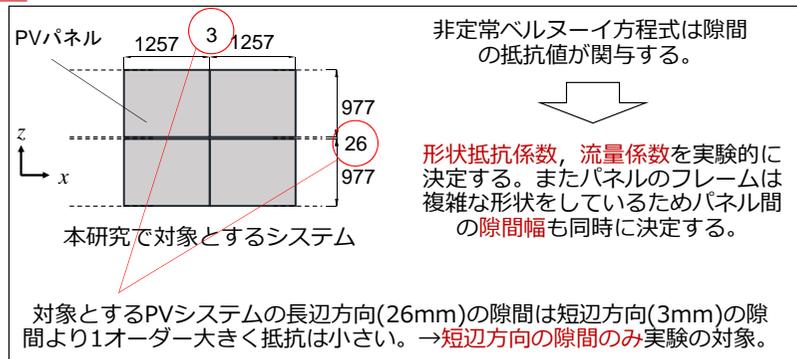
9

PVパネルの屋根面設置位置

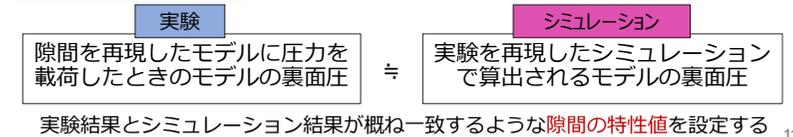


10

隙間特性値同定実験 概要



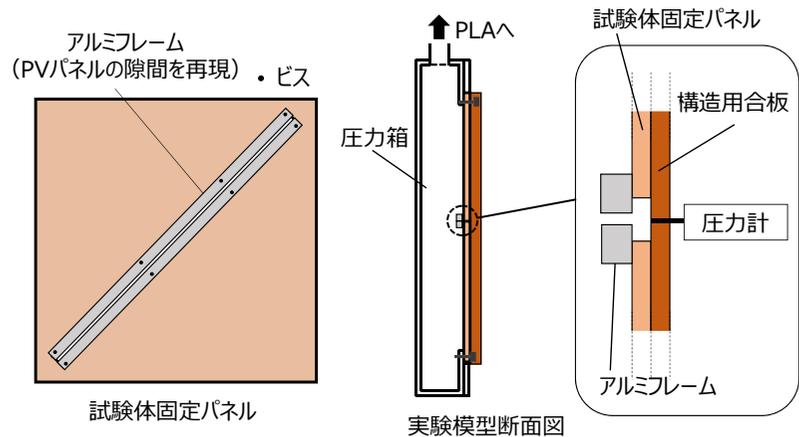
隙間の特性値 推定方法



11

隙間特性値(形状抵抗係数 C_{Lr} 等価な隙間幅 D_e)実験方法

実験には時々刻々変化する圧力を載荷できる動風圧載荷装置PLAを用いる。入力荷重は風洞実験で得られた風圧時刻歴を用いる。



12

隙間特性値(形状抵抗係数 C_L , 等価な隙間幅 D_e)のシミュレーション

非定常ベルヌーイ方程式を応用したシミュレーション式

$$[\dot{U}_e] = \frac{q}{\rho l_e} [C_e] - \frac{q}{\rho l_e} [C_i] - \frac{C_L}{2l_e} [U_e | U_e] - \frac{p_f}{\rho l_e}$$

ただし $p_f = 64 \frac{\nu l_e \rho}{D_e^2} |U_{i,j}|$

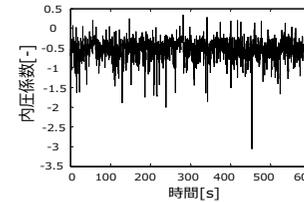
- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| U_e : 流速 [m/s] | l_e : 隙間の深さ [m] |
| q : 速度圧 [Pa] | C_L : 形状抵抗係数 [-] |
| ρ : 空気密度 [kg/m ³] | ν : 動粘性係数 [m ² /sec] |
| C_e : 外圧係数 [-] | D_e : 等価な隙間幅 [m] |
| C_i : 内圧係数 [-] | |

実験で求まる外圧係数を入力値とし
等価な隙間幅及び形状抵抗係数の値を変えていき、
実験で測定される内圧係数と等しくなるよう、隙間の特性値を決定

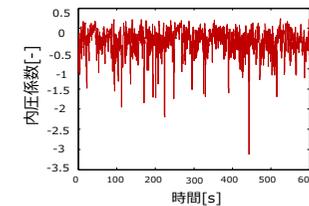
隙間特性値(形状抵抗係数, 等価な隙間幅)実験結果

非定常ベルヌーイ方程式を応用したシミュレーション式

$$[\dot{U}_e] = \frac{q}{\rho l_e} [C_e] - \frac{q}{\rho l_e} [C_i] - \frac{C_L}{2l_e} [U_e | U_e] - \frac{p_f}{\rho l_e}$$



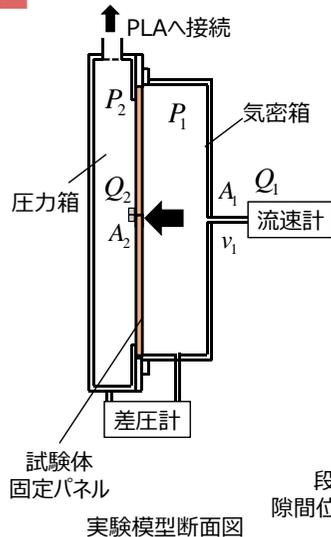
(a) PLAを用いた実験で得られた内圧係数



(b)非定常ベルヌーイ方程式を用いて
計算された内圧係数
($C_L=1.42$, $D_e=3\text{mm}$ とした場合)

形状抵抗係数 $C_L=1.42$, 等価な隙間幅 $D_e=3\text{mm}$ と決定

隙間特性値同定実験(流量係数 α)



流速計位置での流量(Q_1)と実物大システムの
隙間位置での流量(Q_2)は等しい(連続の式)

$$Q_1 = v_1 A_1$$

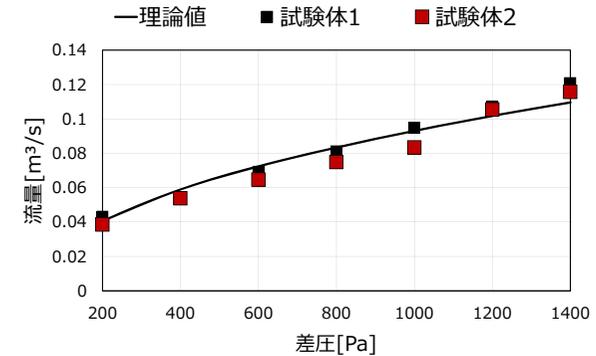
$$Q_2 = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

$$Q_1 \approx Q_2$$

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| v : 流速 [m/s] | ΔP : 差圧 [Pa] |
| A : 断面積 [m ²] | P : 圧力 [-] |
| α : 流量係数 [-] | |

段階式圧力を作用させ、得られる実験の流量と
隙間位置での流量の値が等しくなるよう流量係数を求める

隙間特性値同定実験(流量係数 α) 結果



$\alpha = 0.55$ とした場合
実験により求まる流量を概ね再現できている

シミュレーション式 (内圧と外圧の関係式)

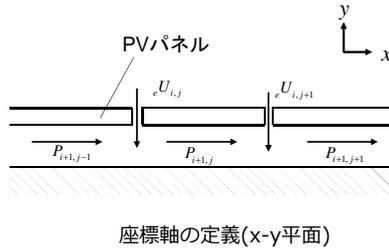
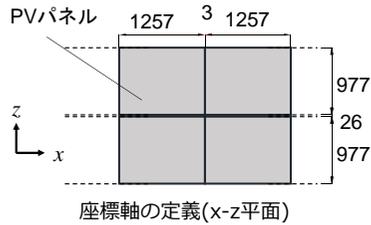
① x軸方向 $\frac{\rho l_{i,j} \dot{U}_{i,j+1}}{q} = C_{i,j} - C_{i,j+1} - \frac{1}{2q} C_{L,i,j} \rho U_{i,j+1} |U_{i,j+1}| - \frac{P_{f,x}}{q}$

② y軸方向 $\frac{\rho l_{i,j} \dot{U}_{i,j}}{q} = C_{i,j} - C_{i,j} - \frac{1}{2q} C_{L,e} \rho U_{i,j} |U_{i,j}| - \frac{P_{f,e}}{q}$

③ z軸方向 $\frac{\rho l_{i,j} \dot{U}_{i,j+1}}{q} = C_{i,j} - C_{i,j+1} - \frac{1}{2q} C_{L,i,j} \rho U_{i,j+1} |U_{i,j+1}| - \frac{P_{f,z}}{q}$

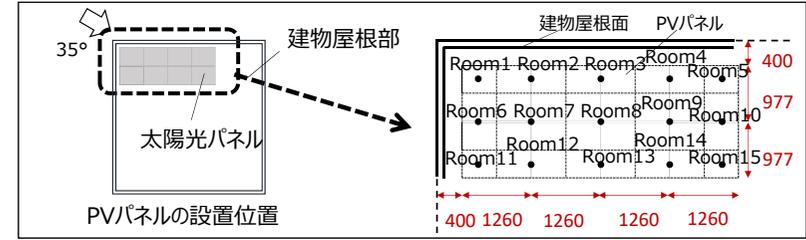
④内圧の時間変化量 $\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma P_0}{V_0} \sum Q$

l_e : 有効長さ[m]
 U : 各方向の流速[m/sec]
 q : 速度圧[Pa]
 $C_{e,i,j}$: 外圧係数[-]
 $C_{i,j}$: 内圧係数[-]
 $P_{f,f}$: 摩擦による圧力損失[Pa]
 C_L : 形状抵抗係数[-]
 P : 圧力[Pa]
 γ : 比熱比[-]
 P_0 : 大気圧[Pa]
 V_0 : 仮想室の体積[m³]
 Q : 流量[m³/s]



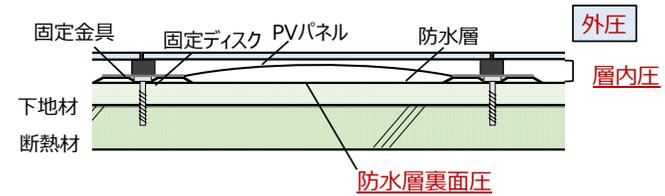
17

PVパネルのピーク風力の算定方法



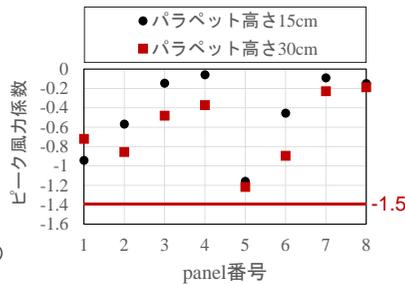
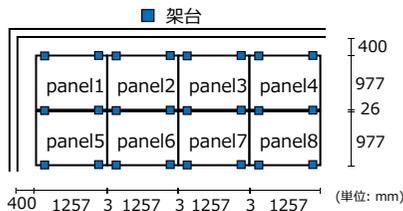
PVパネルのピーク風力の算定方法

風力係数 $C_f = \text{外圧係数}(C_{pe}) - \text{層内圧係数}(C_{pi})$



18

PVパネルの風力係数



JIS C 8955で示される風力係数はPVパネルを隙間0で設置したときの風力係数である。したがってJISの値と比較することでパネル間に隙間を設けることによる風力低減効果の検討を行う

JISによる風力係数(JISC 8955より引用)

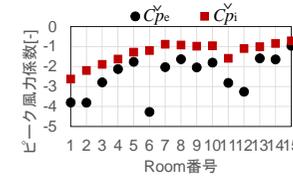
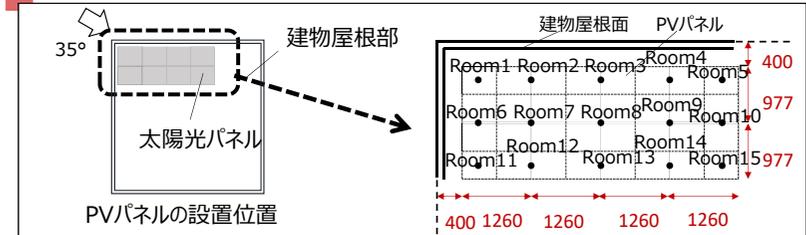
設置形態	風力係数の近似式	太陽電池傾斜角度
陸屋根モデル (負圧, 端部アレイ)	$C_a = 0.6$	$\theta \leq 10^\circ$

JISC8955で示される風力係数は「等価静的風力係数」である。したがって、ガスト影響係数(2.5)を乗じて、 $C_a=1.5$ である。

⇒ 本研究で対象としたシステムのピーク風力係数の絶対値の方が小さく、パネル間に隙間を設けることによる風力低減効果が期待

19

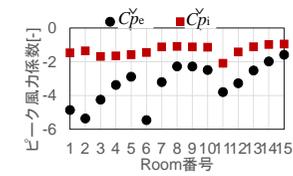
防水層の風力係数



陸屋根モデル(パラペット15cm)

C_{pe}^v : ピーク外圧係数(PVパネルが無い時の防水層のピーク風力係数)

C_{pi}^v : ピーク層内圧係数(PVパネルを設置した時の防水層のピーク風力係数)

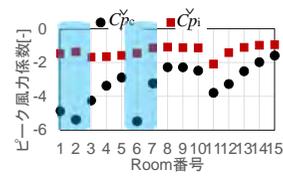
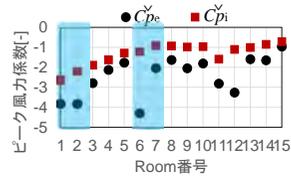
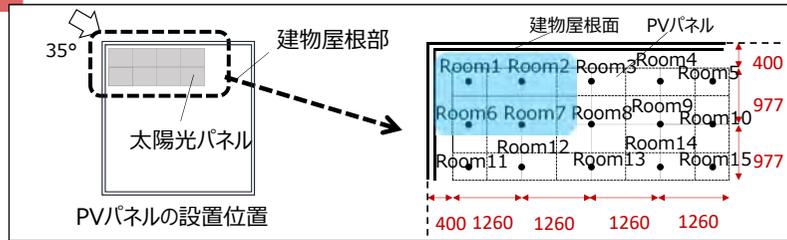


片流れ屋根モデル(屋根平均高さ25m)

ピーク層内圧係数の絶対値がピーク外圧係数の絶対値より小さい。→防水層の風力低減効果が期待される

20

防水層の風力係数

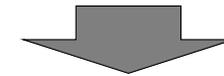


屋根面隅角部でピーク外圧係数とピーク層内圧係数の差が大きい。
→防水層の風力低減効果は屋根面隅角部で大きい

21

まとめ

- PVパネルを屋根面に平行にかつ隙間を設けて、さらに機械的固定工法防水システムと併用することで風力低減に効果的なシステムを提案した。
- その有効性を風洞実験並びにシミュレーションに基づき、検証した。



- パネル間に隙間を設けることでPVシステムに作用する風力が低減された。
- 特に屋根面隅角部に設置したパネルや防水層の風力が大幅に低減された。
- PVパネルを機械的固定工法防水システムと組み合わせることによる防水層の風力低減効果を確認した。

結論

本システムを応用することで**低コスト**で**耐風性が高く**、**環境的に優れた**システムを提案できる。

22