

# 勾配屋根設置・地上設置PVモジュールの 風力係数とPVシステムの耐風圧試験

一般財団法人 日本建築総合試験所  
耐風試験室 高森 浩治

2

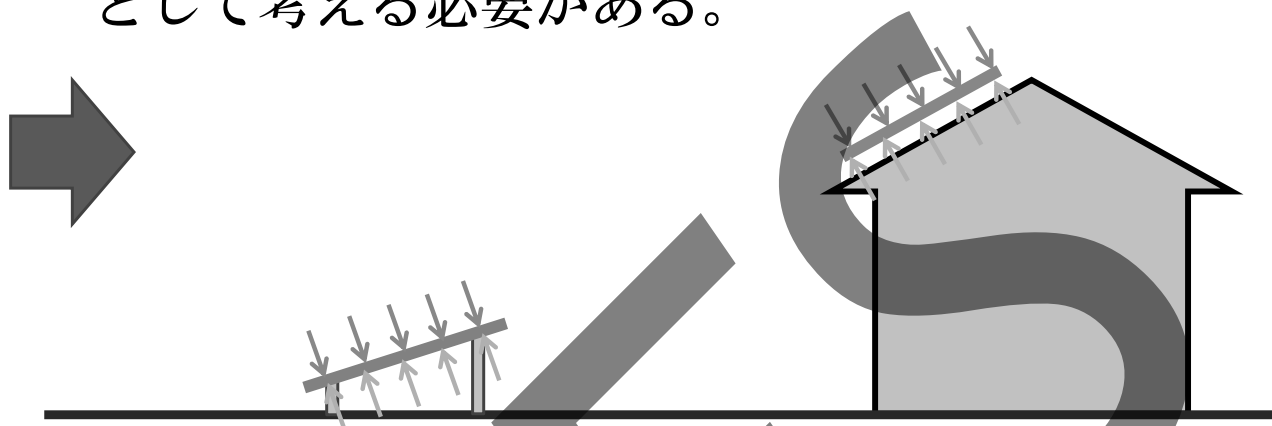
## Menu

- PVに作用する風力と風荷重の算定方法
- 勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数
- 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験
- 地上設置形PVの設計用風力係数（JIS C8955の改定に向けての検討）

## PVに作用する風力と風荷重算定方法

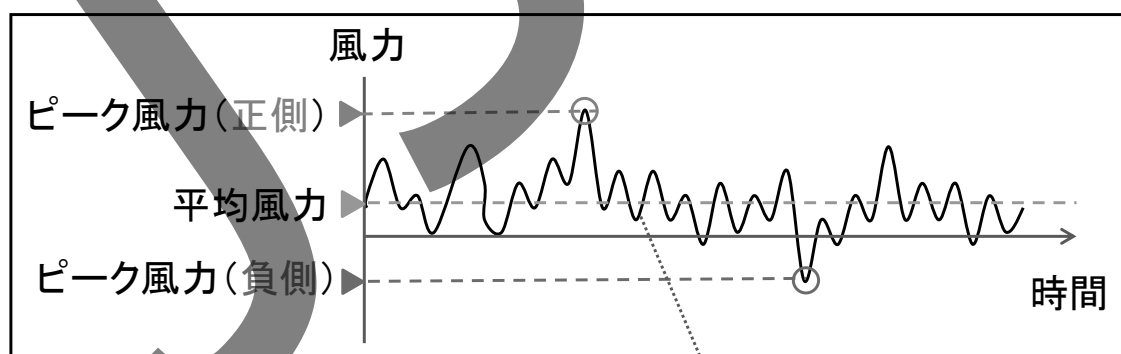
### 風圧と風力

- PVには上面だけでなく下面にも風圧が作用する。
- PVの風荷重は上面と下面の風圧の差（風力）として考える必要がある。



## PVに作用する風力と風荷重算定方法

### 平均風力とピーク風力



- 接近風の乱れなどにより、PVに作用する風力は変動する
- 耐風設計ではピーク風力に対する安全性を確認する必要がある。

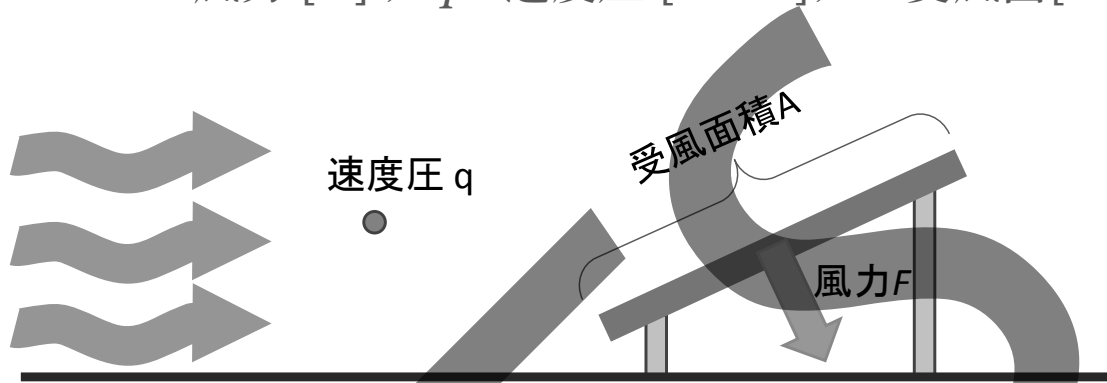
PVに作用する風力と風荷重算定方法

## 風力係数とは

風力係数  $C_f$

$$C_f = F / (q \cdot A)$$

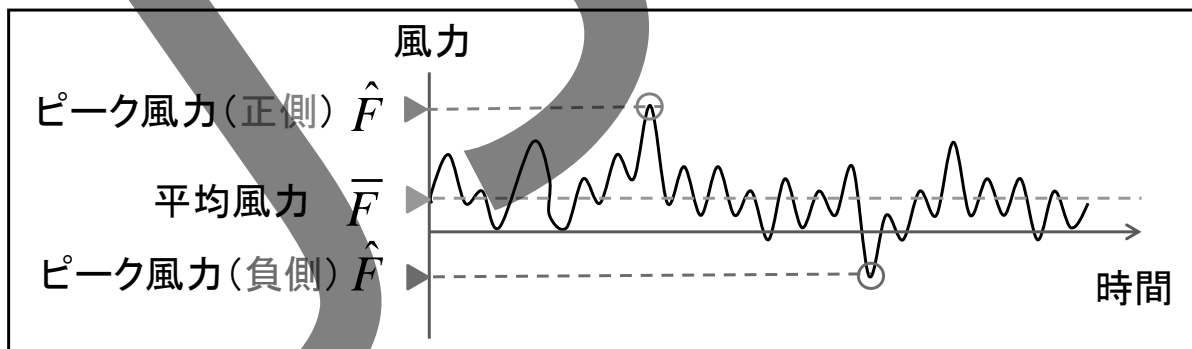
$F$ : 風力 [N],  $q$ : 速度圧 [N/m<sup>2</sup>],  $A$ : 受風面 [m<sup>2</sup>]



風力係数  $C_f$  は縮小模型を用いた風洞実験などにより求められ、その値は実物PVに適用できる。

PVに作用する風力と風荷重算定方法

## 平均風力係数とピーク風力係数



平均風力係数:  $\bar{C}_f = \bar{F} / (q \cdot A)$

ピーク風力係数:  $\hat{C}_f = \hat{F} / (q \cdot A)$

測定センサーやコンピュータの性能が向上し、ピーク風力（ピーク風圧）を精度よく計測できるようになったので、近年ではピーク風力係数  $\hat{C}_f$  を比較的容易に求めることが可能になった。

PVに作用する風力と風荷重算定方法

## 風荷重の計算式

- 平均風力係数  $\bar{C}_f$  を用いる場合

$$\hat{F} = \bar{C}_f \cdot q \cdot G_f \cdot A$$

・建築物の構造骨組風荷重  
・JIS C8955

ガスト影響係数：  
平均荷重に対するピーク荷重の倍率

- ピーク風力係数  $\hat{C}_f$  を用いる場合

$$\hat{F} = \hat{C}_f \cdot q \cdot A$$

・建築物の外装材風荷重

$G_f$ ：ガスト影響係数， $q$ ：速度圧 [N/m<sup>2</sup>]， $A$ ：受風面積 [m<sup>2</sup>]

PVに作用する風力と風荷重算定方法

## ガスト影響係数 $G_f$

- ・平均荷重とピーク荷重の倍率
- ・建築物への接近風の風の乱れ強さや建築物の規模等を考慮して設定されている。

平成12年建設省告示第1454号でのガスト影響係数  $G_f$   
(JIS C8955にも用いられている)

高さH 地表面 粗度区分	10m以上	10mを超え40m未 満の場合	40m以上
	I	2.0	直線的に補間した 数値
II	2.2	2.0	
III	2.5	2.1	
IV	3.1	2.3	

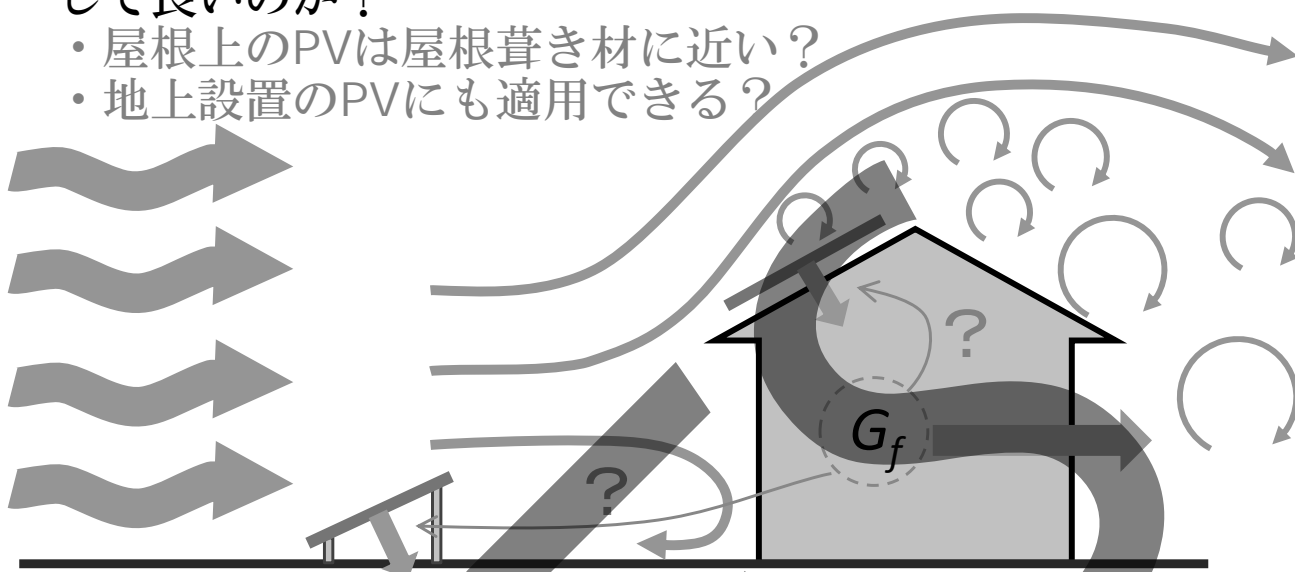
風の乱れ  
大 ← — — — 小

## PVに作用する風力と風荷重算定方法

### ガスト影響係数 $G_f$ のPVへの適用の是非

建築物の構造骨組風荷重に用いられる $G_f$ をPVに適用して良いのか？

- ・屋根上のPVは屋根葺き材に近い？
- ・地上設置のPVにも適用できる？



PVの風荷重の計算にはピーク風力係数を用いる方法が適切であると考えられる

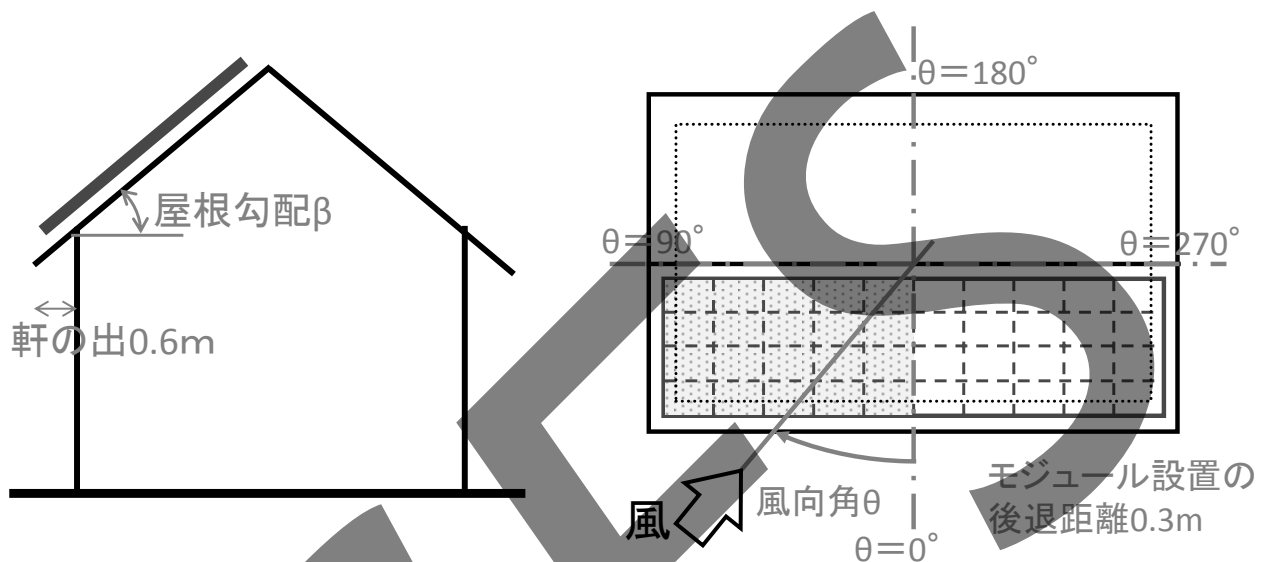
## 勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数

- ・平成22年度 建築基準整備促進事業「風圧力、耐風設計等の基準の合理化に関する調査」での検討結果の紹介。
- ・PVの設計用風力係数（提案値）は風洞実験結果より設定されている。
- ・設計用風力係数は、ピーク風力係数で与えられている。
- ・低層住宅の屋根に設置されるPVを対象とし、屋根は切妻屋根を想定している。

勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数

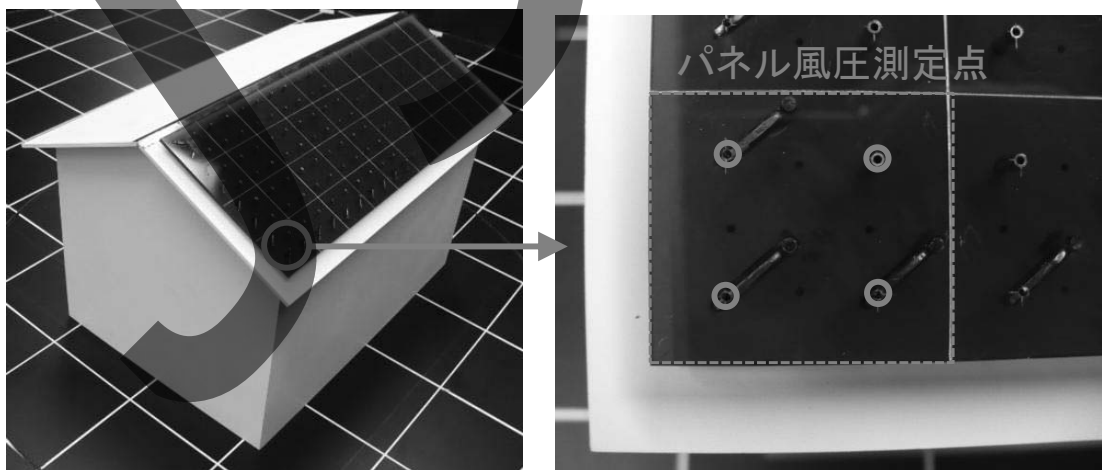
## 風洞実験の概要(1)： 想定した建物とPV

- 2階建の住宅（幅10m×奥行き7m×軒高6m）を想定
- 屋根勾配 $\beta$ ：10，20，24.2（4.5寸），30，40°
- PVモジュールと屋根面の隙間の高さ $d$ ：30，90，150mm



勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数

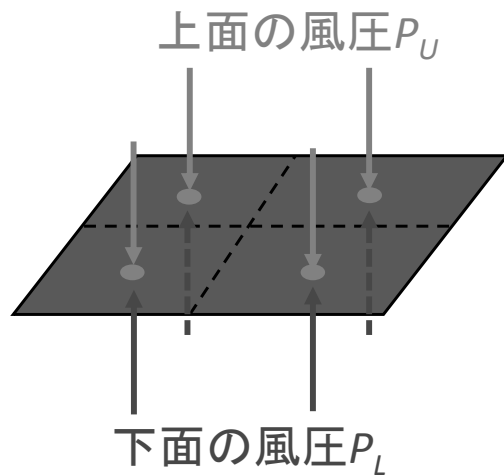
## 風洞実験の概要(2)： 実験模型



- 1枚のモジュールを約 $1\text{m}^2$ と想定した。
- モジュール1枚につき上面4点，下面4点の風圧測定点を設け，各風圧測定点の風圧を同時測定した。

勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数

## 風洞実験の概要(3)： 風力係数



$$C_f = \frac{P_U - P_L}{q \cdot A}$$

$P_U$  : 上面の風圧(4点の面積平均値)

$P_L$  : 下面の風圧(4点の面積平均値)

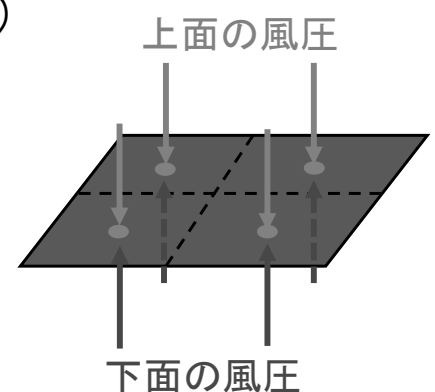
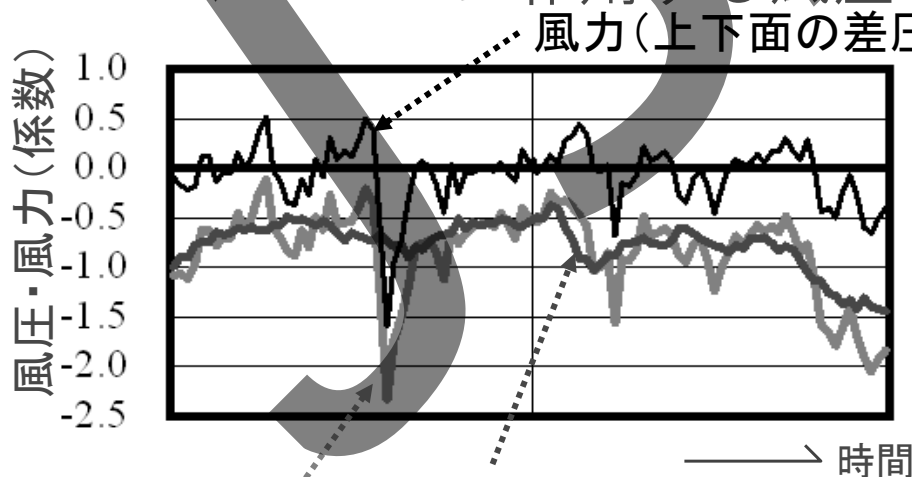
$q$  : 接近風の世界速度圧

$A$  : モジュールの面積

上面4点, 下面4点の風圧測定結果から, モジュールに作用する風力の時系列を求め, その時系列でのピーク値からピーク風力係数を算出

勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数

## モジュールに作用する風圧と風力の関係



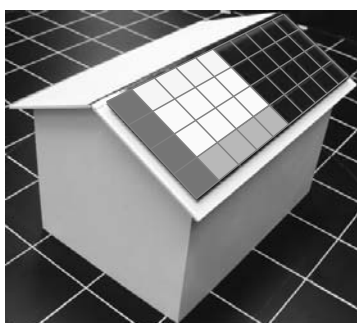
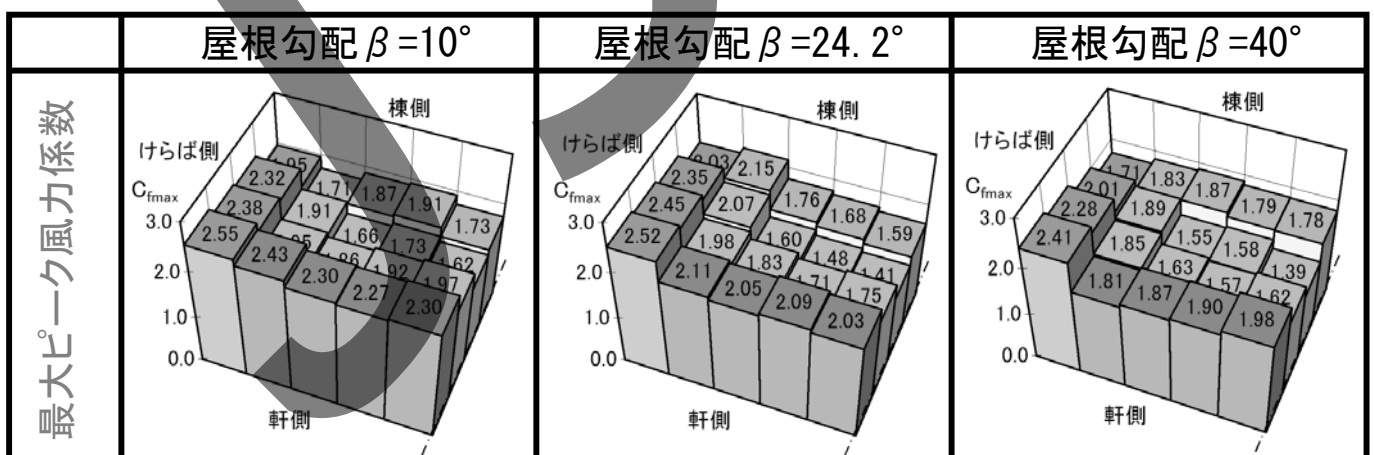
上面の風圧 下面の風圧

- 上面, 下面ともに平均風圧は近い値になる場合がある。
- 下面の風圧は, 上面の風圧に比べて変動が小さい。
- 上面と下面の風圧変動の違いにより, 強いピーク風圧が発生する。

## 勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数 設計用風力係数の設定方針

- ここでの設計用風力係数は，次の方針をもとに設定されている。
  - (1) 設計用風力係数はピーク風力係数で与える。
  - (2) 1枚のモジュールの大きさを対象に設定する。
  - (3) 全風向中の正側の最大値（最大ピーク風力係数）および負側の最小値（最小ピーク風力係数）をもとに設定する。

## 勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数 ピーク風力係数の全風向での最大値の分布



(パネルと屋根の隙間 $d=90\text{mm}$ 相当)

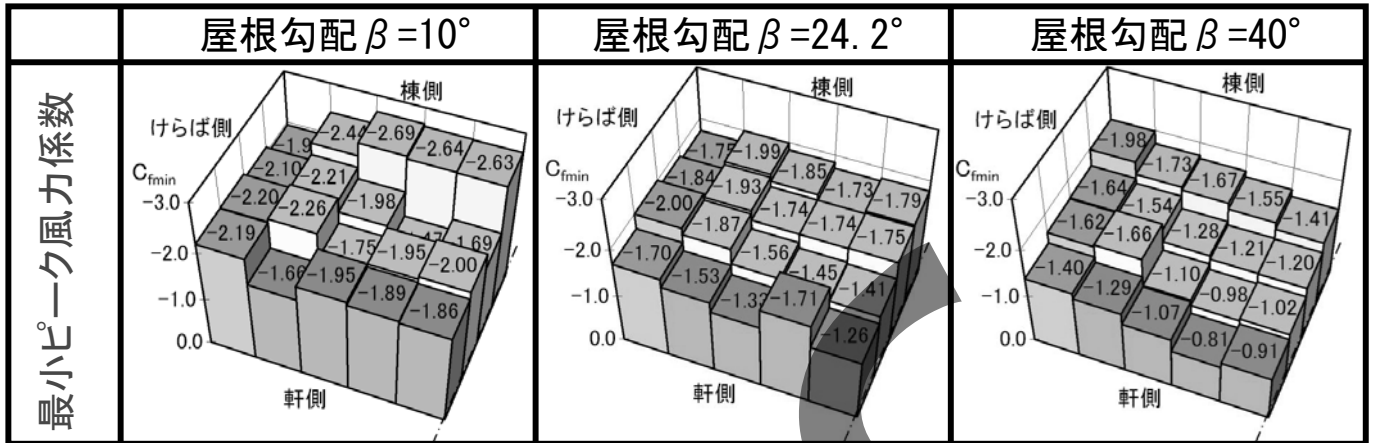
□ 棟部 ■ けらば部 ▨ 軒部 □ 一般部

- 屋根勾配で変化せず，けらば部で2.4～2.6程度の値を示す。
- 部位による差は比較的小さい。

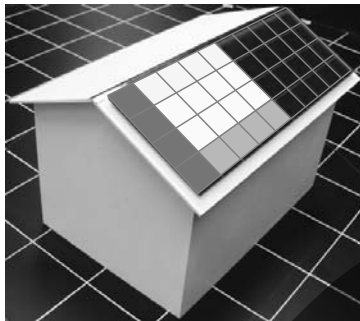


### 勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数

## ピーク風力係数の全風向での最小値の分布



(パネルと屋根の隙間  $d = 90\text{mm}$  相当)

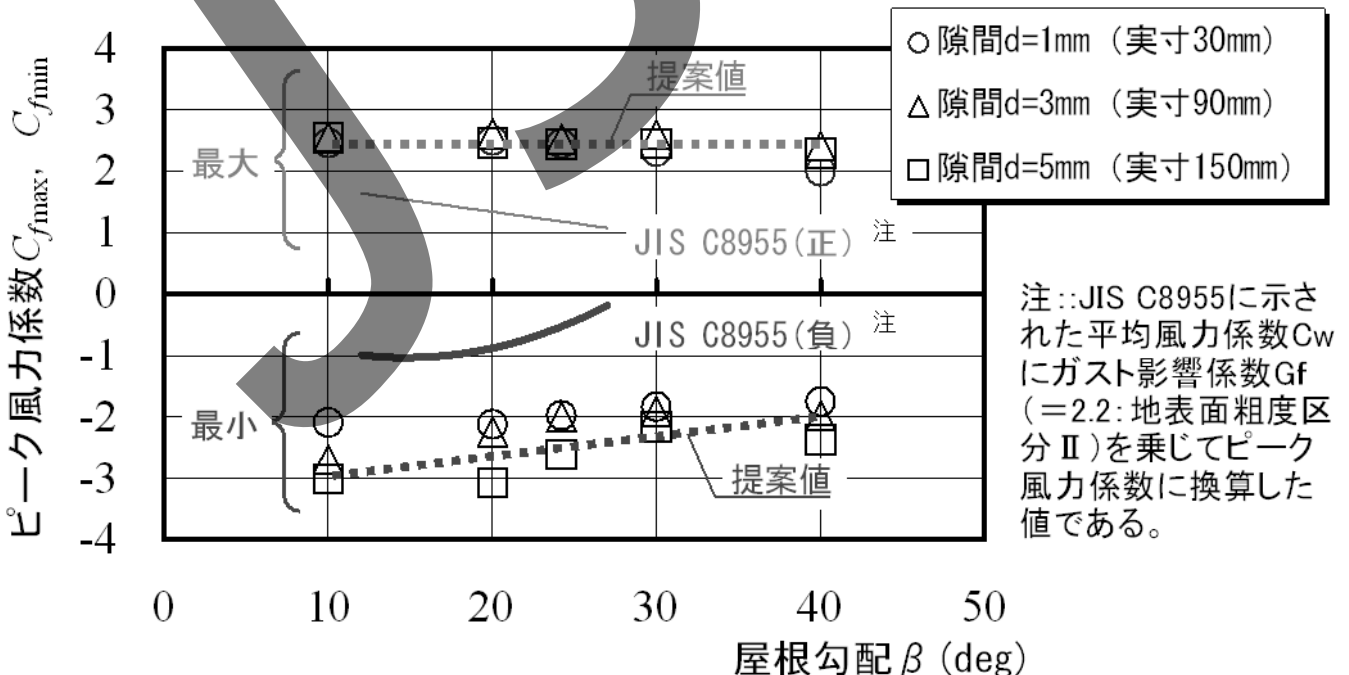


棟部
  けらば部
  軒部
  一般部

- ・ 屋根勾配の増加に伴い，最小ピーク風力係数の絶対値はやや小さくなる
- ・ 一般部でも比較的小さい（絶対値が大きい）値を示す。

### 勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数

## 設計用ピーク風力係数（提案値）



注：JIS C8955に示された平均風力係数  $C_w$  にガスト影響係数  $G_f$  ( $= 2.2$ : 地表面粗度区分 II) を乗じてピーク風力係数に換算した値である。

最大・最小ピーク風力係数の全パネル中での最大値および最小値の屋根勾配  $\beta$  による変化

## 勾配屋根に設置されるPVの設計用風力係数

### まとめ

- PVに作用する風力の特徴を理解し、適切な設計風荷重を設定する必要がある。
- JIS C8955により求められる勾配屋根設置のPVの設計風荷重は、過小である可能性が高い。
- 適切な設計風荷重を設定するためには、近年の研究成果を積極的に活用する必要がある。
- PVの耐風設計に関する基規準を早期に見直す（あるいは新たに制定する）必要がある。

## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験

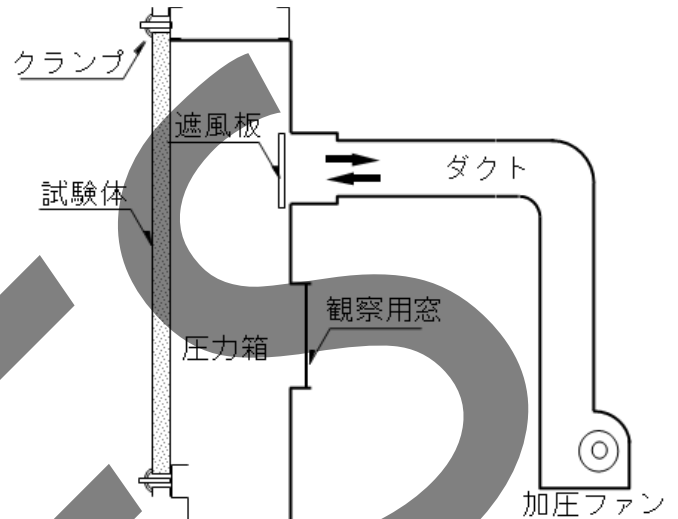
- 金属屋根上に設置されるPVシステムを対象に圧力箱方式の耐風圧性能試験を行なった事例を紹介。



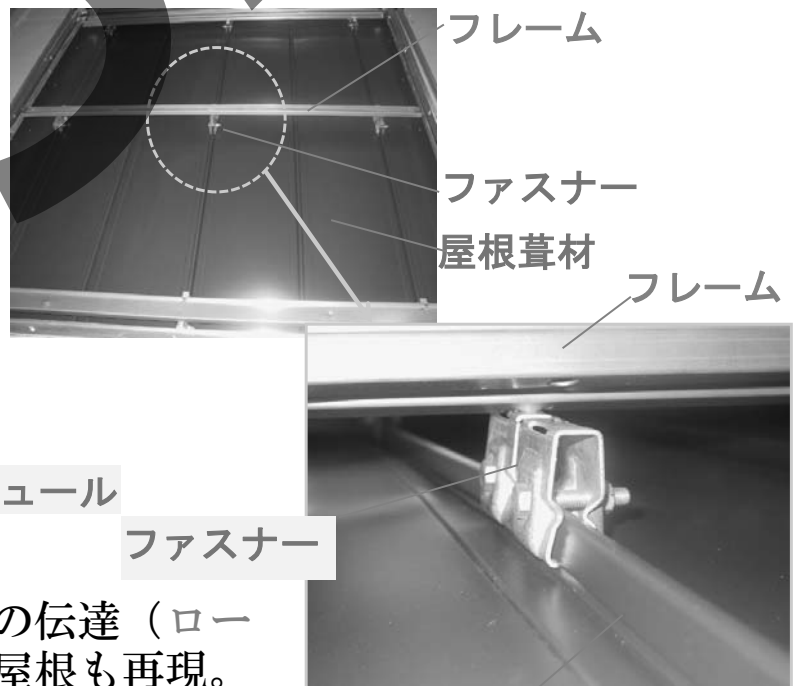
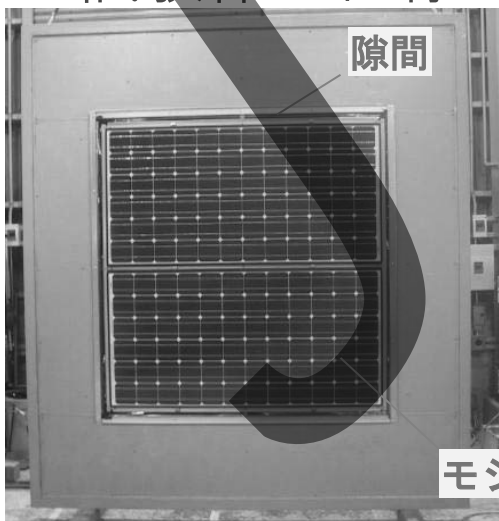
立平葺金属屋根に  
施工されたPV

## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 耐風圧試験装置（圧力箱）

- 建築物の外装材の耐風圧試験に一般的に用いられる装置



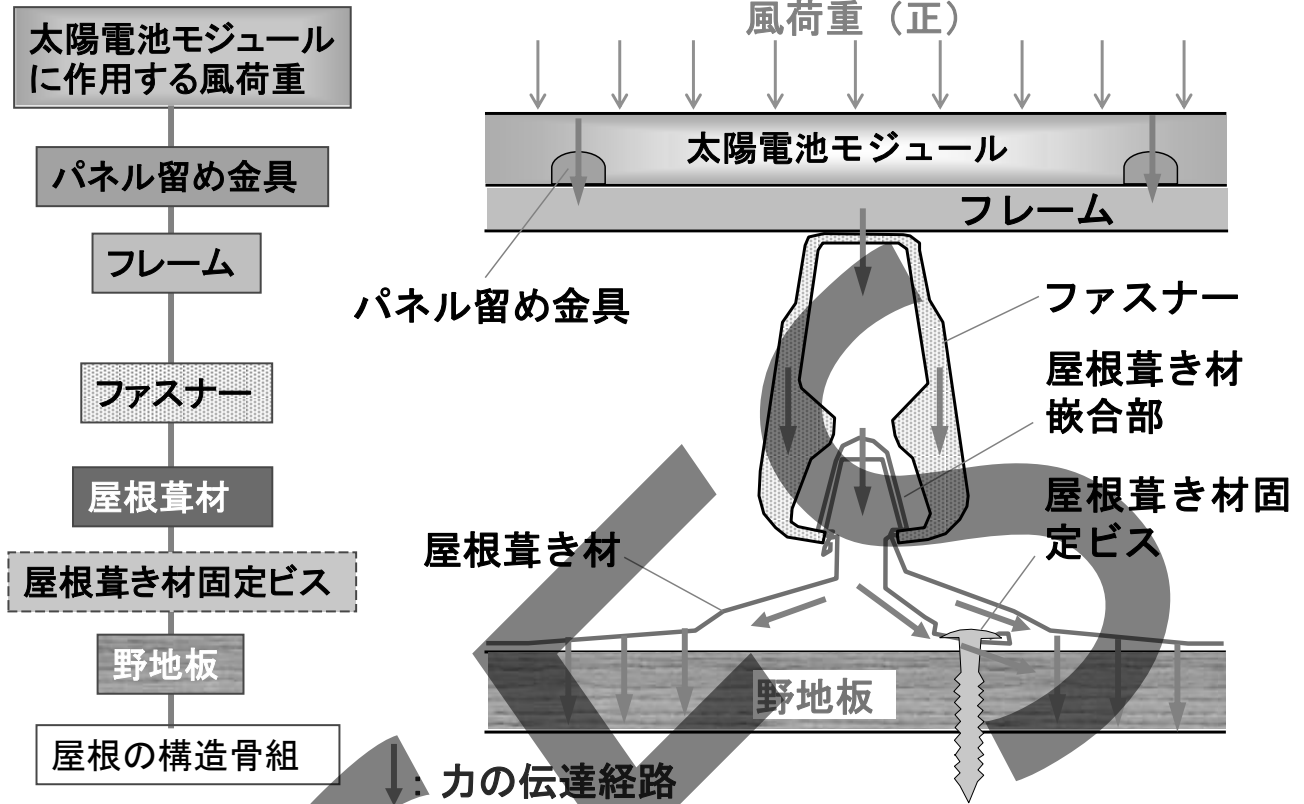
## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 試験体の仕様



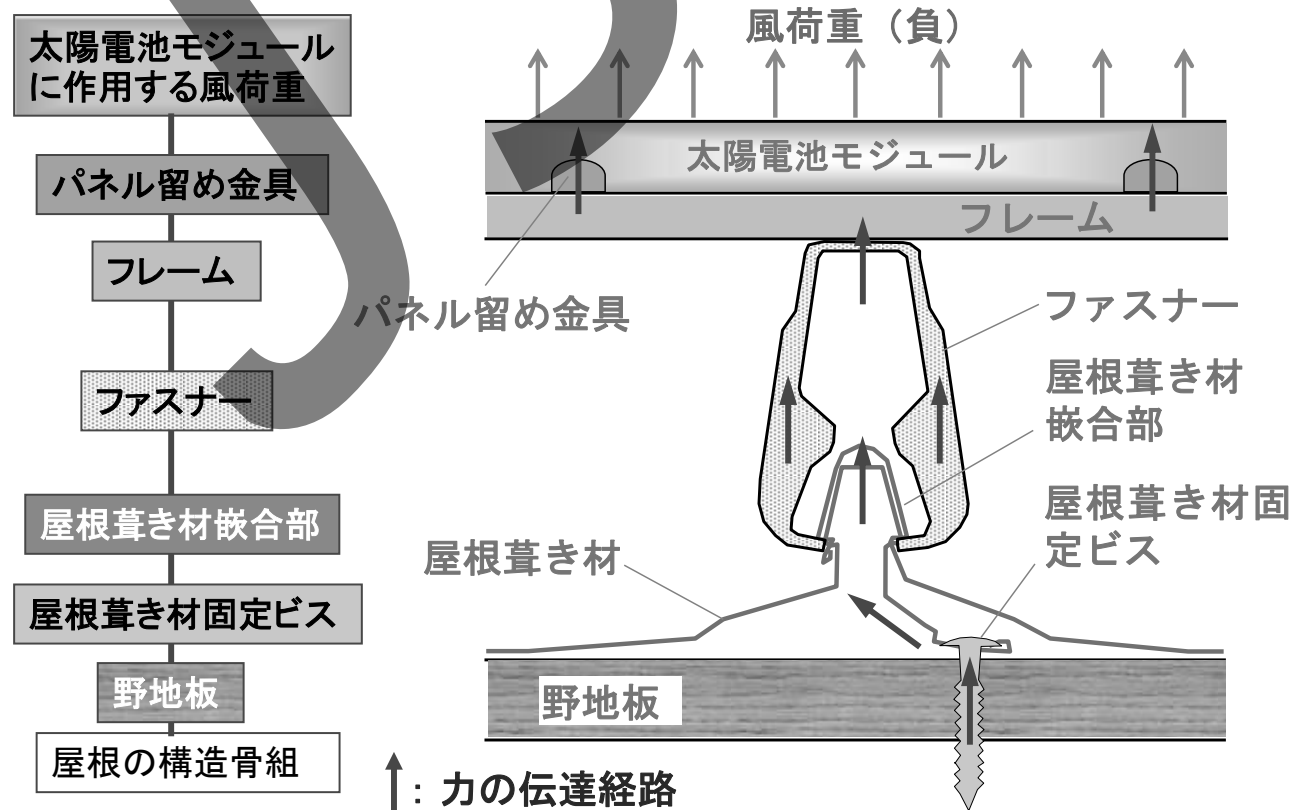
- モジュールからの風荷重の伝達（ロードパス）を考慮し、金属屋根も再現。
- フレームに作用する荷重を適切に与えるために2枚のモジュールを再現。

屋根葺材の嵌合部

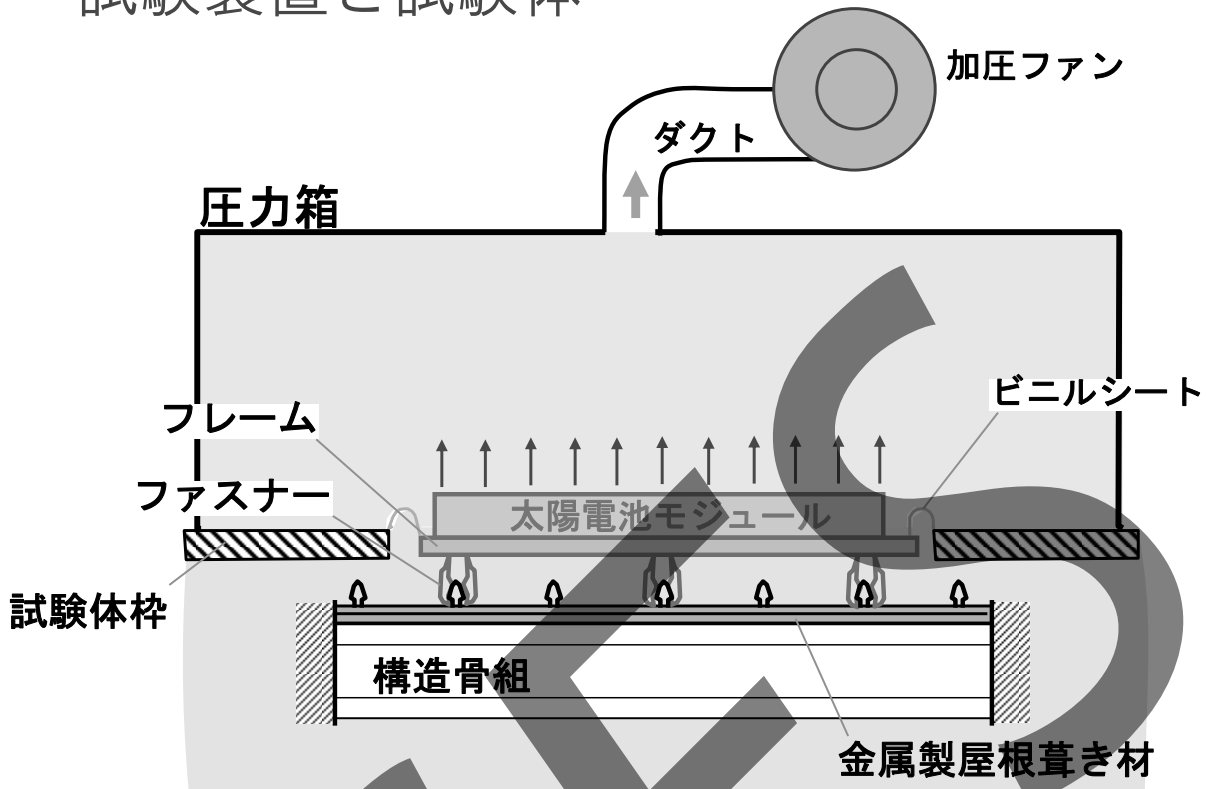
## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 風荷重のロードパス（正荷重の場合）



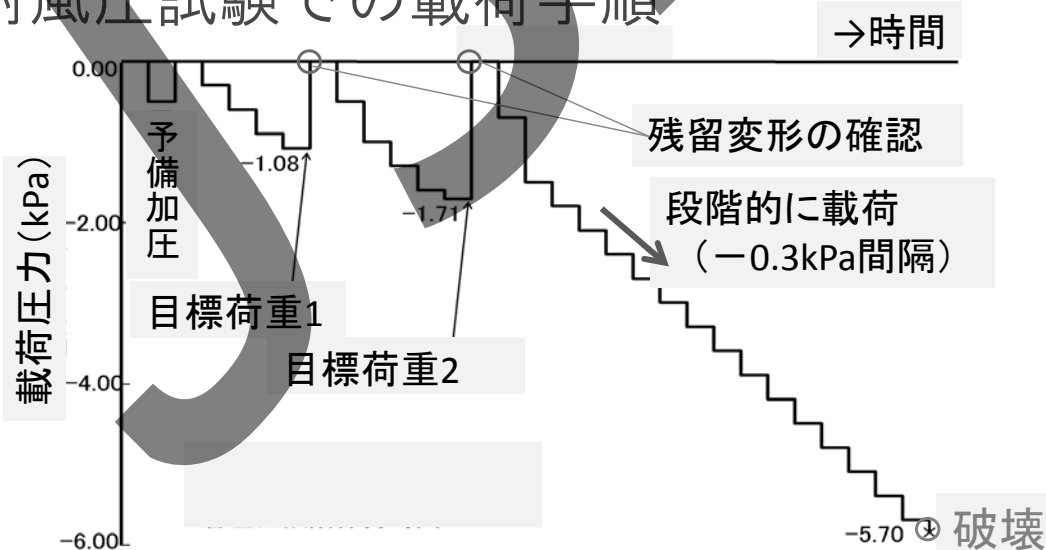
## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 風荷重のロードパス（負の荷重の場合）



## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 試験装置と試験体

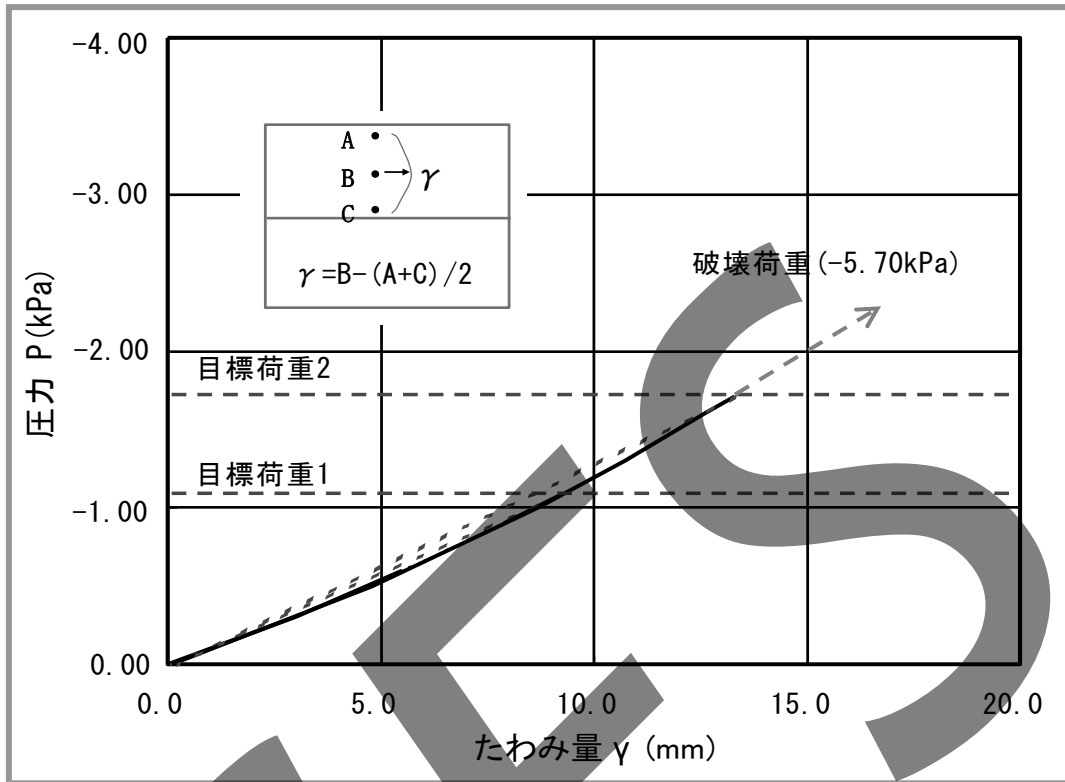


## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 耐風圧試験での载荷手順

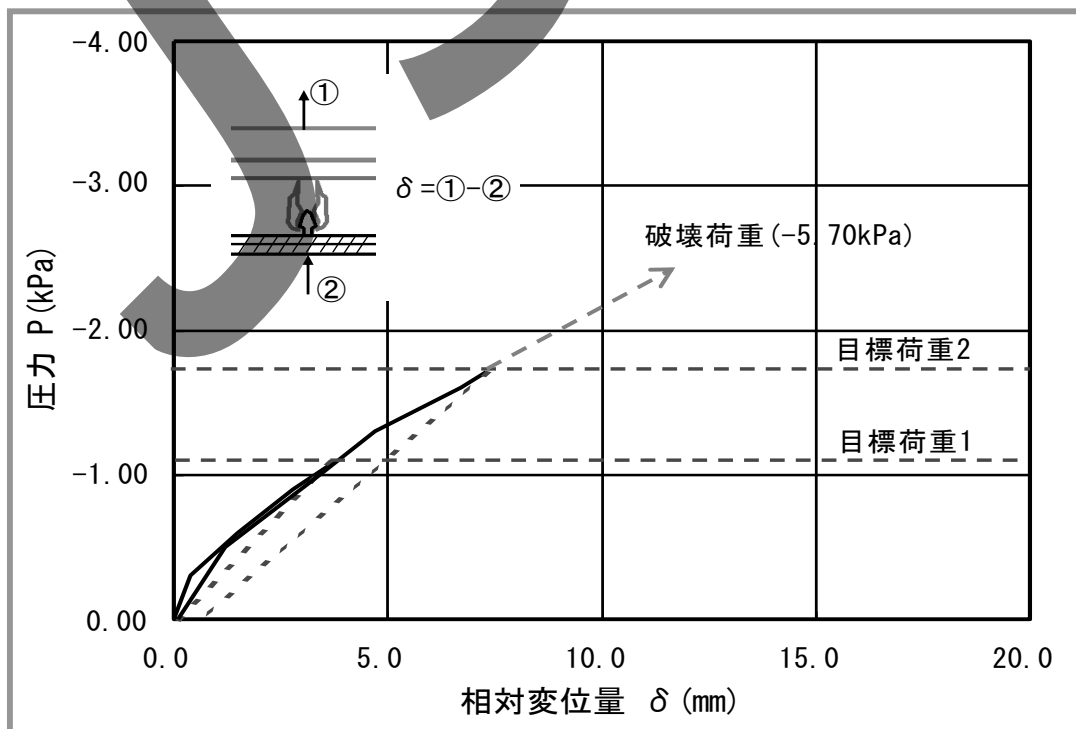


- ・目標荷重は、太陽光モジュールが設置される建物の建設地、建物高さ、屋根勾配などを想定し、その条件下での設計風荷重をもとに設定。
- ・耐風圧試験結果を広く活用するために、目標荷重をいくつかの条件について複数設定する場合がある。

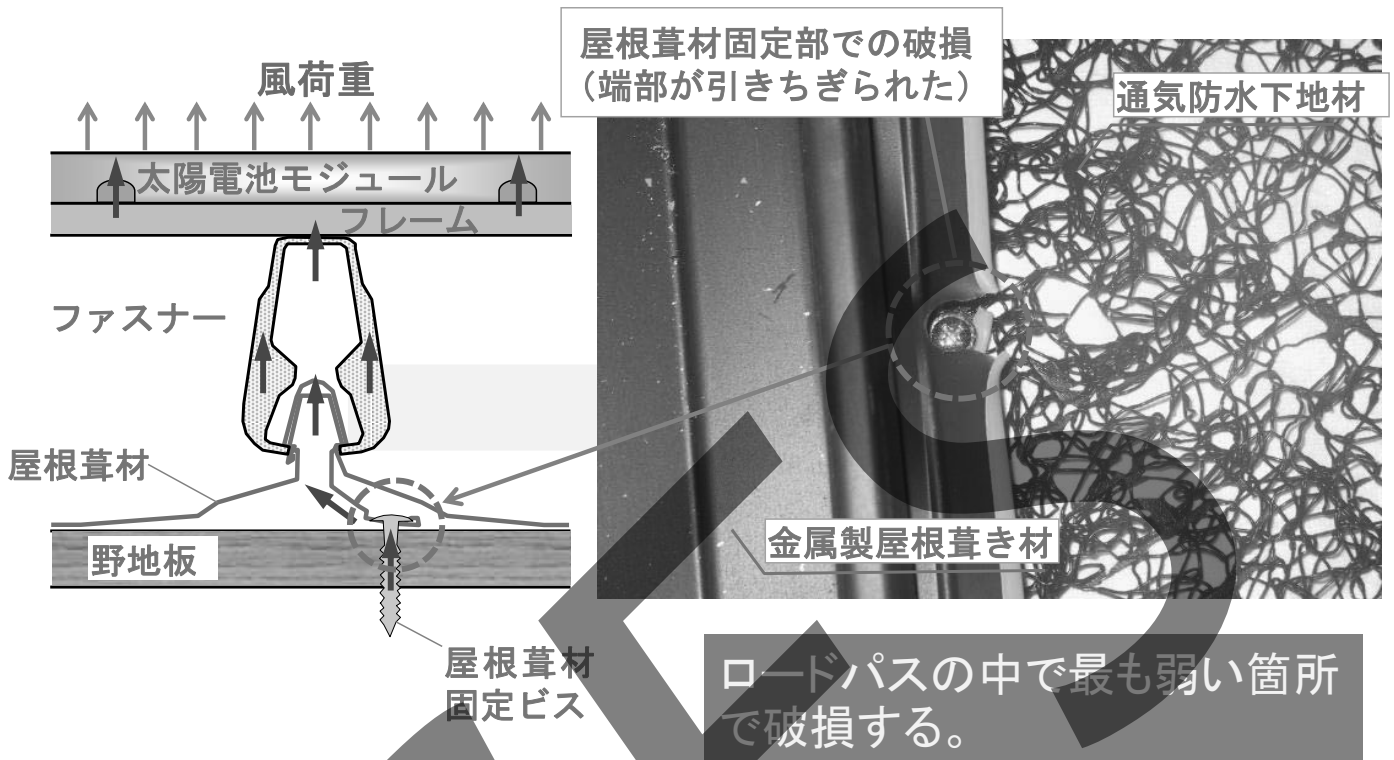
## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 試験結果の例(1)：モジュールのたわみ



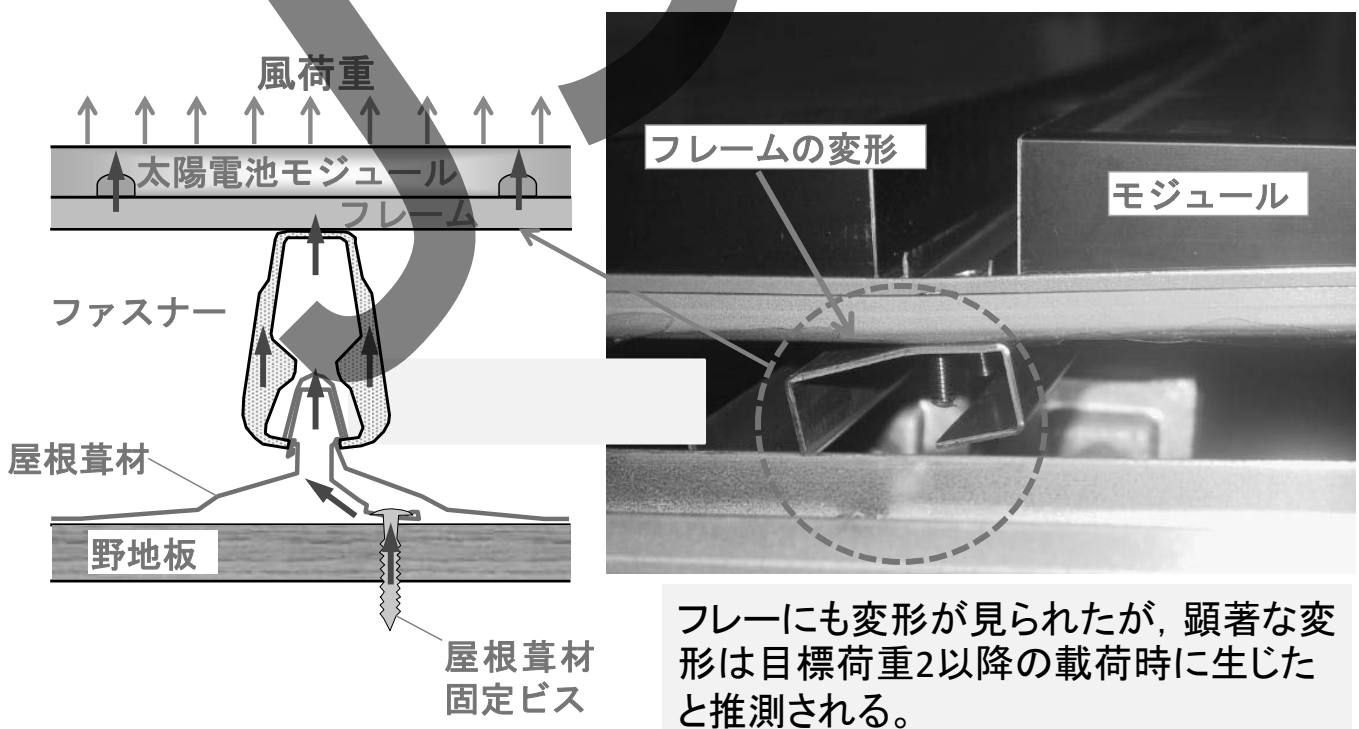
## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 試験結果の例(2)： モジュール上面と野地板との相対変位



## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 試験後の試験体（破壊状況）



## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 試験後の試験体（破壊状況）

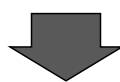


## 金属屋根上に設置されるPVシステムの耐風圧性能試験 まとめ

- 風荷重のロードパスを理解し，適切な耐風設計を行う必要がある。
- 個々の部材の強度試験だけでは，想定されない破壊が生じる可能性もあるので，屋根の構造骨組までのロードパスが再現された試験体を用いた耐風圧試験が有効である。

## 地上設置形PVの設計用風力係数

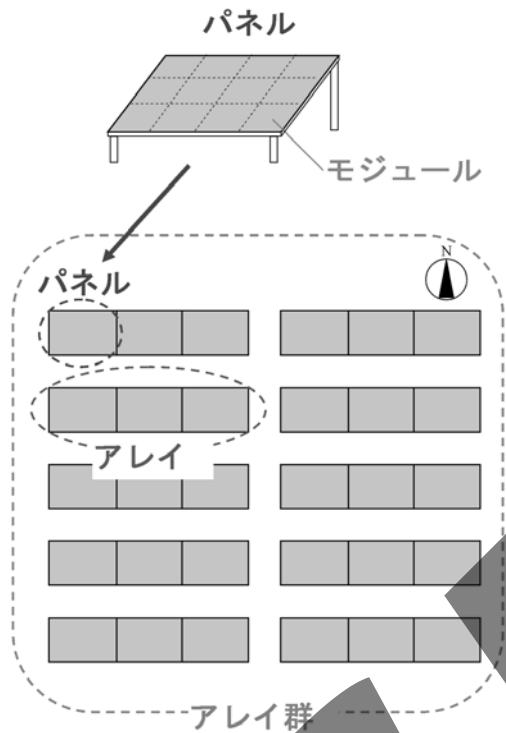
- JIS C8955での地上設置型PVの風力係数は与えられているが，その勾配範囲は $15^{\circ}$  ~  $45^{\circ}$  の範囲に限定されている。
- ところが，近年の太陽電池場パネルは $15^{\circ}$  未満の緩勾配や $45^{\circ}$  を超える急勾配のものが増加している。



日本電機工業会 が検討委員会を作成し，経産省からの委託事業としてJIS C8955の改定に向けての活動を行なっている。

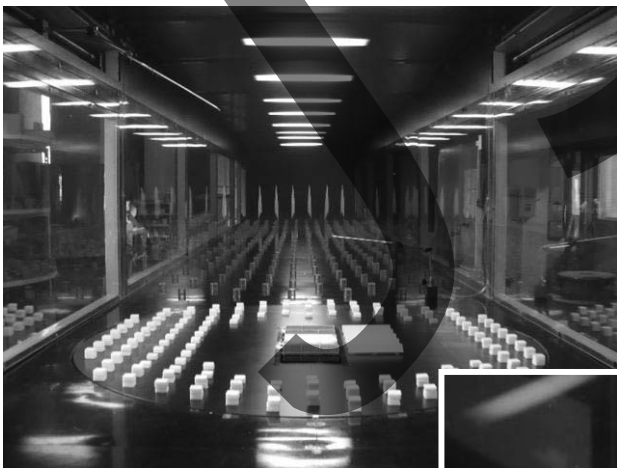


## 地上設置形PVの設計用風力係数 風洞実験の概要

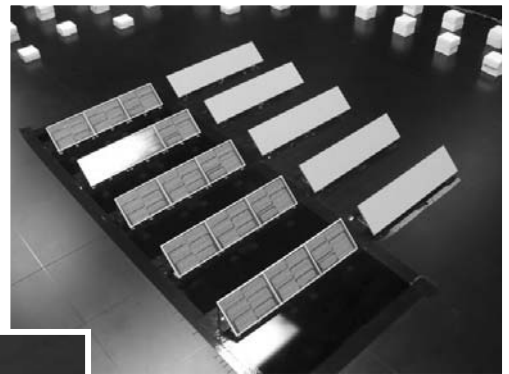


- 測定ケース：  
単独パネル, アレイ群
- 勾配:  $5^{\circ}$  ~  $60^{\circ}$  の9段階
- パネルの持上げ高さ:  
0.5m, 2m(単独パネル)
- アレイ群での中間通路:  
なし, あり(幅3m)
- 風力係数: パネル単位で算出

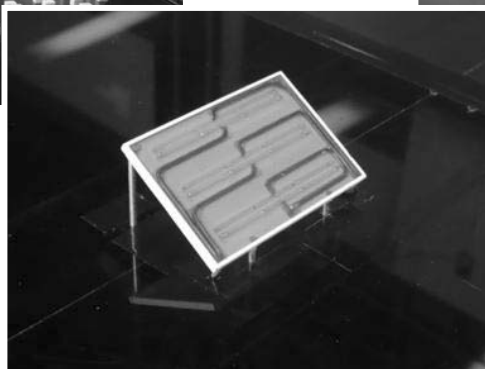
## 地上設置形PVの設計用風力係数 実験模型



風洞実験状況



アレイ群の模型



単独パネルの模型

## 地上設置形PVの設計用風力係数 風力係数の定義

### • 等価平均風力係数 $\tilde{C}_f$

ピーク風力係数をガスト影響係数で除した風力係数。  
ガスト影響係数を乗じることでピーク風力係数と等価な値をもつ。

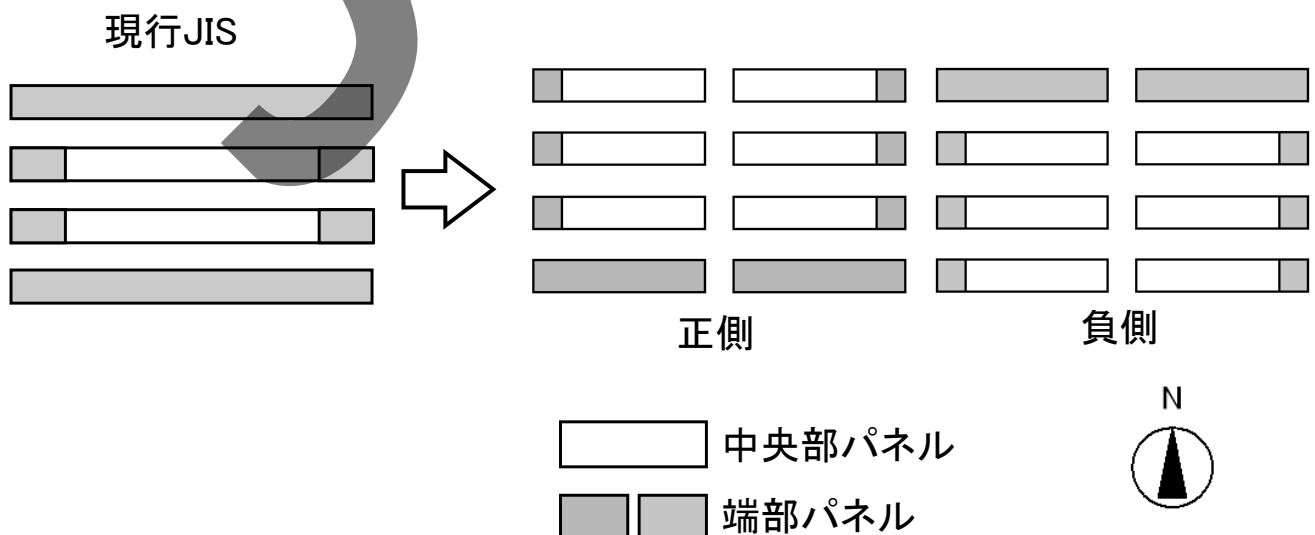
$$\tilde{C}_f = \frac{\hat{F}}{\bar{q} \times G_f \times A} = \frac{\hat{C}_f}{G_f}$$

ピーク風力  $\hat{F}$   
 平均速度圧  $\bar{q}$   
 ガスト影響係数  $G_f$   
 パネルの面積  $A$   
 JIS C8955での設計速度圧  $G_f$

## 地上設置形PVの設計用風力係数

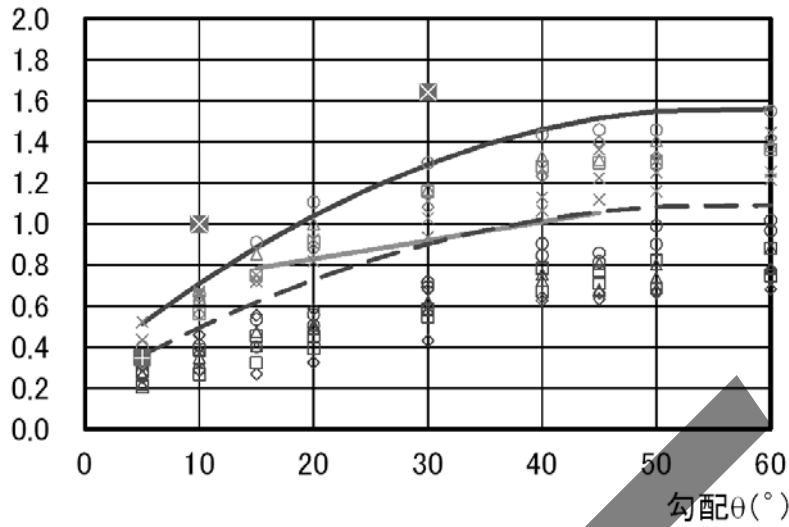
### 設計用風力係数のゾーニング

- 風洞実験結果より，正側と負側でゾーニングを行なうほうが合理的であることが分かった。



# 地上設置形PVの設計用風力係数 等価平均風力係数の全風向中の最大値および 設計用風力係数の提案式(正側)

風力係数



中間通路あり

○ No.1  
○ No.2  
○ No.3  
△ No.4  
△ No.5  
△ No.6  
□ No.7  
□ No.8  
□ No.9  
◇ No.10  
◇ No.11  
◇ No.12  
× No.13  
× No.14  
× No.15

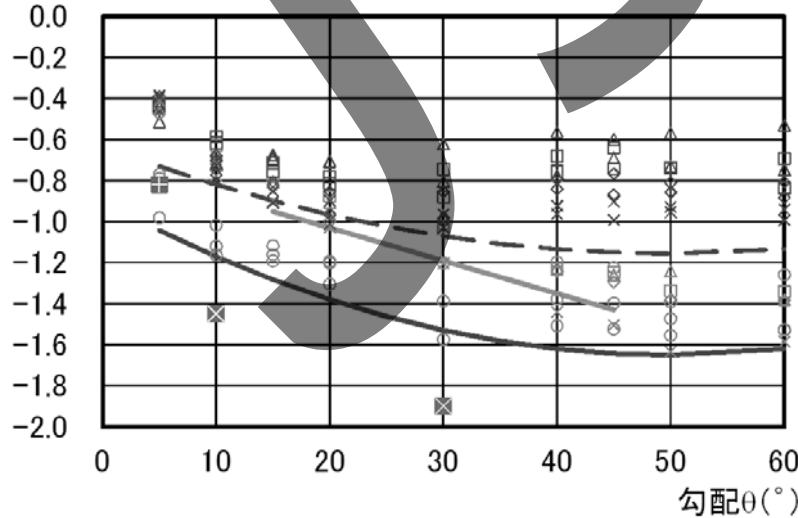
No.1	No.2	No.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No.4	No.5	No.6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No.7	No.8	No.9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No.10	No.11	No.12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No.13	No.14	No.15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

— JIS C8955  
 ⊠ 山本2)     中央部パネル  
 ⊞ 相原3)     端部パネル

- 正側(端部) :  $C_{f, pos} = -0.0004\theta^2 + 0.045\theta + 0.3$
- 正側(中央部) :  $C_{f, pos} = (-0.0004\theta^2 + 0.045\theta + 0.3) \times 0.7$

# 地上設置形PVの設計用風力係数 等価平均風力係数の全風向中の最大値および 設計用風力係数の提案式(負側)

風力係数



中間通路あり

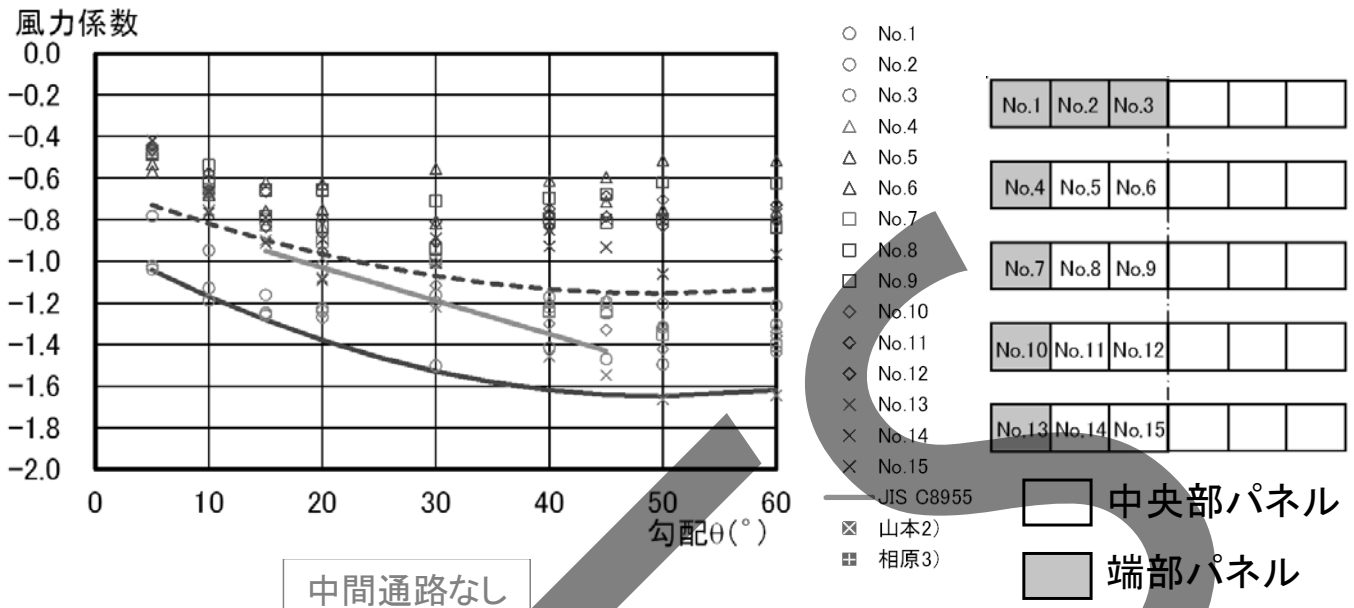
○ No.1  
○ No.2  
○ No.3  
△ No.4  
△ No.5  
△ No.6  
□ No.7  
□ No.8  
□ No.9  
◇ No.10  
◇ No.11  
◇ No.12  
× No.13  
× No.14  
× No.15

No.1	No.2	No.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No.4	No.5	No.6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No.7	No.8	No.9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No.10	No.11	No.12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No.13	No.14	No.15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

— JIS C8955  
 ⊠ 山本2)     中央部パネル  
 ⊞ 相原3)     端部パネル

- 負側(端部) :  $C_{f, neg} = 0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9$
- 負側(中央部) :  $C_{f, neg} = (0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9) \times 0.7$

## 地上設置形PVの設計用風力係数 等価平均風力係数の全風向中の最大値および 設計用風力係数の提案式(負側)



- 負側(端部) :  $C_{f, neg} = 0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9$
- 負側(中央部) :  $C_{f, neg} = (0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9) \times 0.7$

## 地上設置形PVの設計用風力係数 まとめ

- パネル勾配θ が5° ~60° の地上設置型太陽電池パネルの設計用風力係数の計算式を提案している。  
正側:  $C_{f, pos} = -0.0004\theta^2 + 0.045\theta + 0.3$   
負側:  $C_{f, neg} = 0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9$
- これらの設計用風力係数は、現行JISの値より大きい。
- 正側と負側のそれぞれについて端部ゾーンを設定した。
- 中央部パネルの風力係数の低減は3割程度が妥当である。