

太陽エネルギー利用設備の耐風安全性
—機械強度要件の動向および木質架台耐久性の進展—

太陽光発電設備への風荷重および構造耐力の考え方

東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻

植 松 康

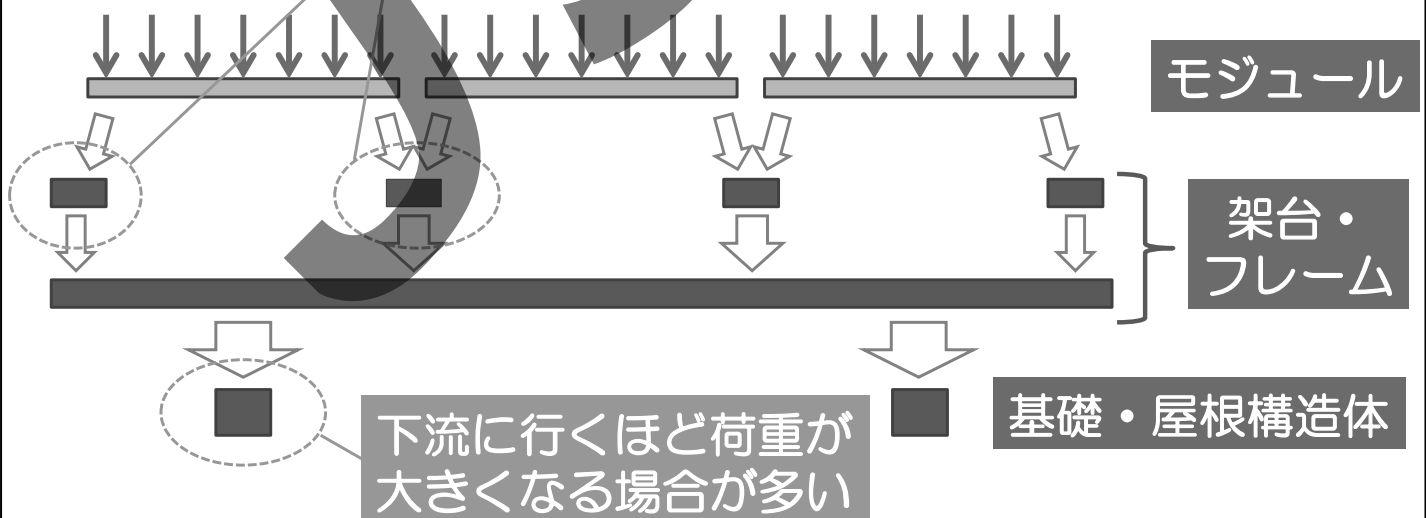
発表内容

1. PVSの耐風性能と安全性評価の基本
力の流れと破壊(具体的な被害事例に学ぶ)
確率論に基づく安全性評価
PVSに求められる構造性能
再現期間と安全性
2. 風荷重評価の基本
構造骨組用風荷重と外装材用風荷重
風荷重算定法
3. PVSの耐力評価方法
4. 強風被害低減対策

PVSの耐風性能と安全性評価

力の流れ(模式図)

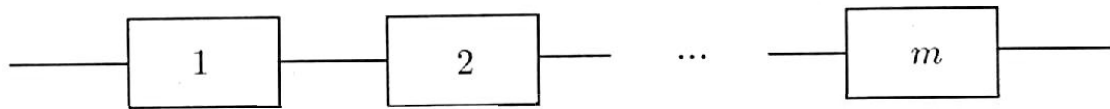
同じ部材でも荷重の大きさが異なる



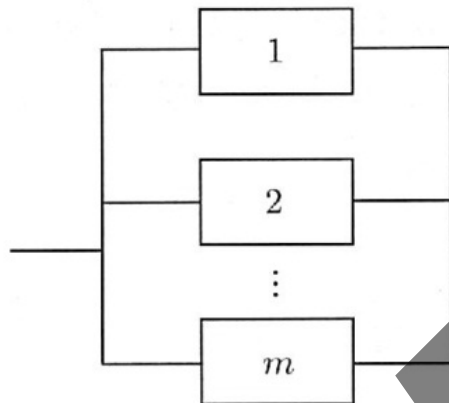
構造物全体の破壊

部材・接合部を流れる力 > 部材・接合部の耐力

構造システムと安全性



直列システム → 1要素の破壊が全体の破壊につながる



並列システム

脆性要素
で構成

→ 荷重の再配分によるシステムの連鎖的破壊

靱性要素
で構成

→ システムの破壊は全部材が破壊したとき

→ 1要素の破壊が必ずしも全体の破壊につながらない

最近の強風被害の例

群馬県伊勢崎市での被害

- 2016年6月15日16時00分頃、前橋市から伊勢崎市で突風が発生し、ビニールハウスの倒壊や住家の屋根の一部飛散、多数の樹木の倒木や屋根瓦の飛散などの被害が発生。
- 気象庁はダウンバーストと認定。
- 強さは藤田スケールで「F1」と推定。
 - ・ 33～49m/s（約10秒間の平均風速）
 - ・ 屋根瓦が飛び、ガラス窓が割れる。ビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木は幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると、道から吹き落とされる。

群馬県伊勢崎市での被害

- 地上設置形PVシステムの約600枚のモジュールが飛散。
- 総発電量400kwのうち、300kw分の架台に被害。
- システムの完成後約1カ月で被害発生。
- 隣接するパイプハウスが被害を受けていない。



隣接する農業用のビニールハウス（パイプハウス）は残っている

群馬県伊勢崎市での被害



杭が抜けた跡



- 風上側となった北側のアレイは、杭から抜けて架台ごと飛散。

(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

群馬県伊勢崎市での被害

太陽光発電設備の仕様

- 架台仕様 :
 10段縦置き (流れ方向長さ16m) 12~15° 傾斜架台
 (10段縦置きは業界でも異例?)
 φ48.6mm×12.4mm (JIS規格品) を使用した単管架台
 モジュールの固定は引っ掛け式, ねじ留めではない
 ⇒架台単管のピッチがずれるとモジュールが外れる機構
 架台の高さ: 水下側GLから500mm, 水上側GLから4300mm
- モジュール: ulica solar (UL-255P-60) 中国製
- 支柱ピッチ: 段方向, 列方向ともに3100mm ※杭ピッチ
- 単管の埋込: 800mm 一部1000mm埋込の箇所もあるとのこと
- 地盤状況 : 崩壊した架台の地盤は約700~800mmの盛土

(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

群馬県伊勢崎市での被害

突風による単管杭の引抜き荷重の推定

突風の強さは「F1」と推定： $V = 33 \sim 49 \text{m/s}$ （10秒間平均風速）

- 33m/sと仮定した場合

引抜き力 $P = \text{風荷重 } W - \text{自重 } M$

$$= 0.95 \times 0.6 \times 33^2 \times 9.61 - 20 \times 9.8 \times 9.61 = 4081 \text{ [N]}$$

- 49m/sと仮定した場合

$$\text{引抜き力 } P = 0.95 \times 0.6 \times 49^2 \times 9.61 - 20 \times 9.8 \times 9.61 = 11268 \text{ [N]}$$

設計用引抜き力が $P = 3978 \text{ [N]}$ （許容耐力）であったので、杭の引抜き力が確保できていれば被害を受けていなかったかもしれない。

（奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

群馬県伊勢崎市での被害

JIS C8955による設計風荷重

- 基準風速 V_0 : 30m/s（群馬県）
- 地表面粗度区分 : III（ $Z_G = 450 \text{m}$, $Z_b = 5 \text{m}$, $\alpha = 0.20$ ）
- アレイの高さ H : 2.4m（アレイ面の平均高さ）
- 用途係数 I : 1.0（通常の太陽光発電システム）
- 設計風速 V_H : 20.7m/s（10分間平均風速）
- ガスト影響係数 G_f : 2.5
- 設計速度圧 q_p : 642N/m²
- 風力係数 C_w : 0.95（地上設置, 勾配15° 逆風）

- 単位面積当たりの風荷重 W/A_w :

$$W/A_w = 0.95 \times 642 = 610 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

（奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

群馬県伊勢崎市での被害 単管杭の設計用引抜き荷重

- 単管杭1本当たりの負担面積（受風面積） A_w :
杭（柱）間隔が3.1mなので、 $A_w = 3.1 \times 3.1 = 9.61 \text{ [m}^2\text{]}$
- 単管杭1本当たりの作用する設計風荷重 W
 $W = 610 \text{ [N/m}^2\text{]} \times 9.61 \text{ [m}^2\text{]} = 5862 \text{ [N]}$ 鉛直上向き（の荷重）
- 単管杭1本当たりの作用する設計引抜き荷重 P
架台を含むシステムの自重を $20 \text{ [kg/m}^2\text{]}$ として差し引いて、単管杭の設計用の引抜き荷重を求めると、
 $P = 5862 - (20 \times 9.8 \times 9.61) = 3978 \text{ [N]}$

単管の引抜に強度としては、高すぎる値？

この単管杭に期待できる？

（奥地建産株） 高森浩治氏提供）



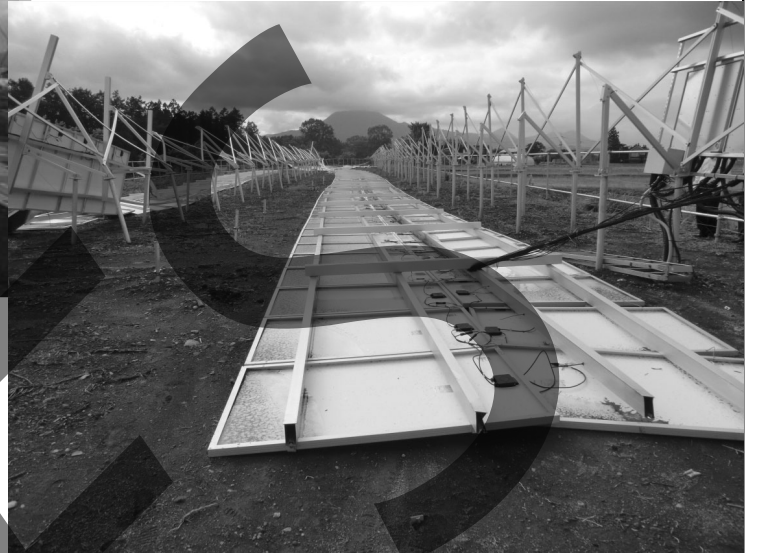
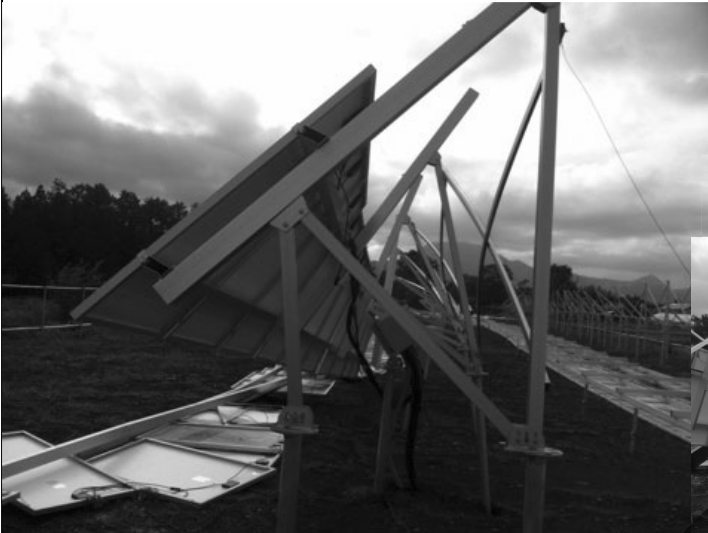
群馬県伊勢崎市での被害 モジュール固定部の形状も疑問



（奥地建産株） 高森浩治氏提供）

最近の強風被害例（地上設置型）

岩手県紫波郡紫波町
伊勢崎市での被害の翌日
近隣のビニールハウスは無被害



フレームと柱との接合部の耐力不足？

((有)吉富電気 吉富政宣氏提供)

最近の強風被害例（地上設置型）

台風1515号
福岡県行橋市



スクリー杭



基礎の定着力不足？
構造全体の耐力不足？



最近の強風被害例（地上設置型）

強風で吹き飛んだ太陽光パネルが民家を直撃

福岡県柳川市
2015年台風15号



「空から巨大な手裏剣が飛んできた!？」(NHK「所さん!大変ですよ」)
((有)吉富電気 吉富政宣氏提供)

最近の強風被害例（屋根上設置型）

台風1426号
千葉県匝瑳市



基礎の屋根への定着力不足？

((有)吉富電気 吉富政宣氏提供)

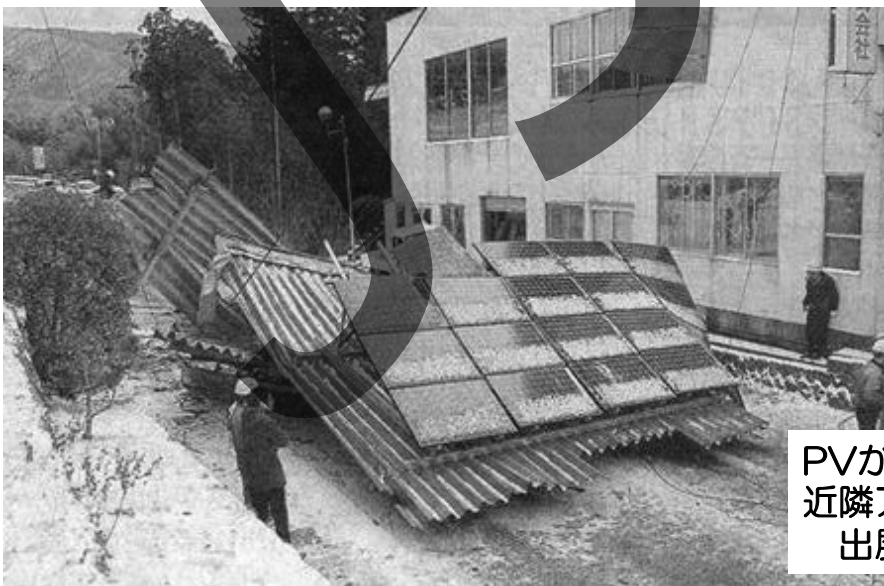
最近の強風被害例（屋根上設置型）



基礎の屋根への定着力不足？

((有)吉富電気 吉富政宣氏提供)

最近の強風被害例（屋根上設置型）



PVが屋根ごと国道に落下
近隣アメダス最大瞬間風速17m/s
出展：長野日報（2010/01/14）

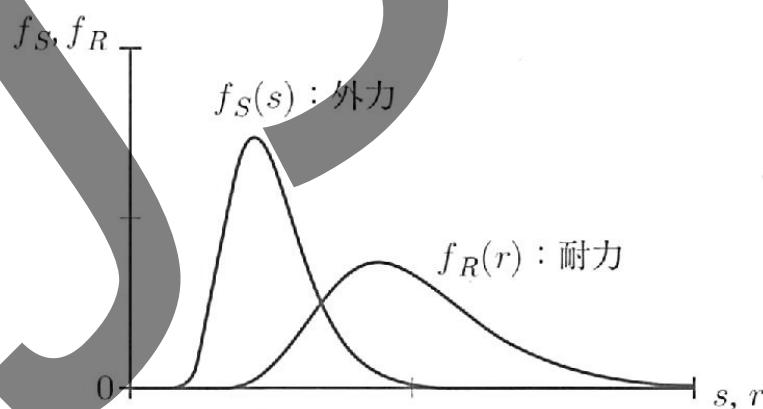
- 荷重の伝達経路（ロードパス）が途切れた事例。
- 屋根と建物骨組の固定部にはPVの風力+屋根の風力が作用する。
- 屋根の固定強度の確認も重要。

((有)吉富電気 吉富政宣氏提供)

強風被害発生の原因

1. 想定外の強い風が吹いた。
→ 設計風速をいくらに設定するか？
2. PVシステムの耐力不足。
 - 風荷重の算定が不適切
→ 力の作用と流れを適切に評価しているか？
 - 耐力評価方法が不適切
→ 耐力試験方法が適切か？
 - 安全率の取り方が不適切。
→ 荷重と耐力のばらつきを適切に考慮？
3. 設計・施工ミス。
4. 維持管理が不適切。

破壊確率の算定



破壊確率
$$p_f = \int_0^{\infty} f_S(s) F_R(s) ds = \int_0^{\infty} f_R(r) [1 - F_S(r)] dr$$

▼
安全率 外力 S および耐力 R のばらつきを適切に評価することが重要 ◀ 各種不確定性も安全率の中で評価される²²

信頼性理論に基づく破壊確率

R および S がいずれも正規分布に従うとき、

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta)$$

$$\beta = \frac{1 - (\mu_S / \mu_R)}{\sqrt{v_R^2 + v_S^2 (\mu_S / \mu_R)^2}} \quad : \text{安全性指標}$$

$$v_S = \frac{\sigma_S}{\mu_S} \quad v_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \quad : \text{変動係数}$$

β の増大 \rightarrow p_f の減少

\uparrow
 μ_R / μ_S の増大, あるいは v_S, v_R の減少

建築物に要求される構造性能(建築基準法)

1. 主構造(柱・梁・基礎, 筋違いなど)
 - ①希に起こる地震・暴風・大雪など
 (再現期間50年程度)
 に対して, 損傷させない(弾性設計)
 - ②極めて希に起こる地震・暴風・大雪など
 (再現期間500年程度)
 に対して, 倒壊させない(弾塑性設計)
2. 外装材(屋根・壁・開口部など。含支持部材)
 脱落させない

PVSに要求される耐風性能(個人的見解)

- ①希に起こる暴風(再現期間50年程度)
に対して、損傷は限定的、破壊しない
- ②極めて希に起こる暴風
(再現期間500年程度、荷重は①の約1.6倍)
に対して、飛散させない
特に、屋上設置型では重要な性能
地上設置型では条件の緩和は可能
(飛散のインパクトが小さい場合)
基本的には建築物外装材と同じ

空飛ぶ凶器～飛散物



0418号台風・北海道



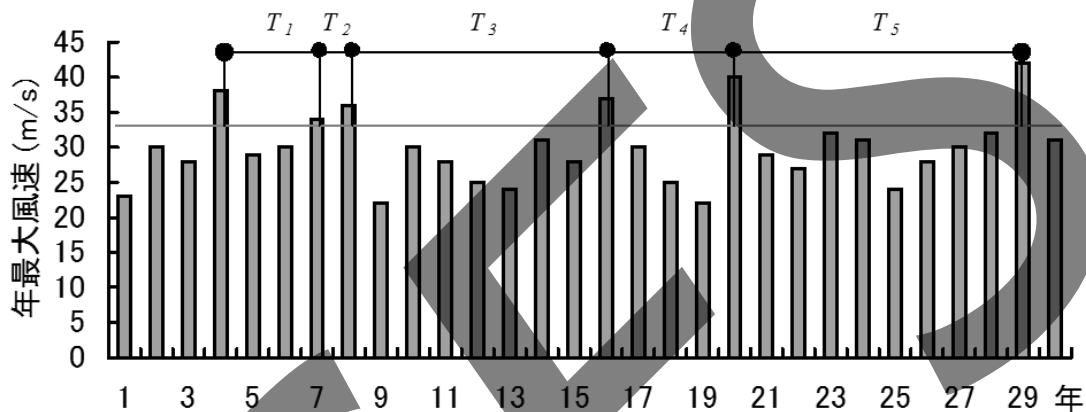
(北海道新聞)

損傷しても飛散させないことが
最も重要

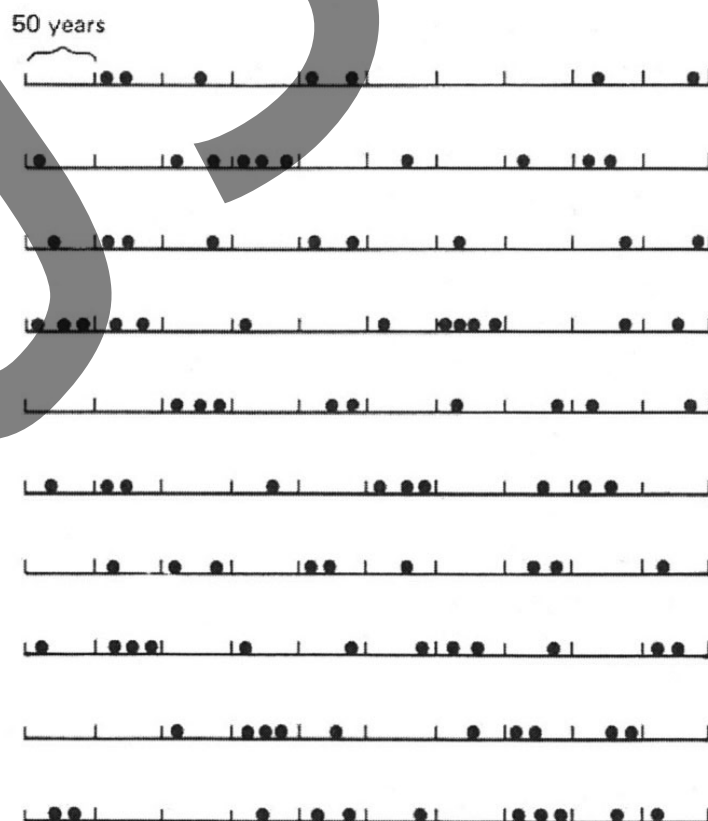
再現期間50年の風速とは？

- 年最大風速が、ある風速を超える平均的な年数を風速の再現期間という。
- 再現期間50年の風速は、50年間に起こり得る最大の風速ではない。

再現期間は T_1, T_2, T_3, \dots の平均値



再現期間50年の風速とは？



再現期間と安全性

耐用年数(供用年数)20年のPVを再現期間50年の風速で設計するのは安全すぎる？

No!

供用期間中に1度も設計風速を超えない確率

$$p = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N$$

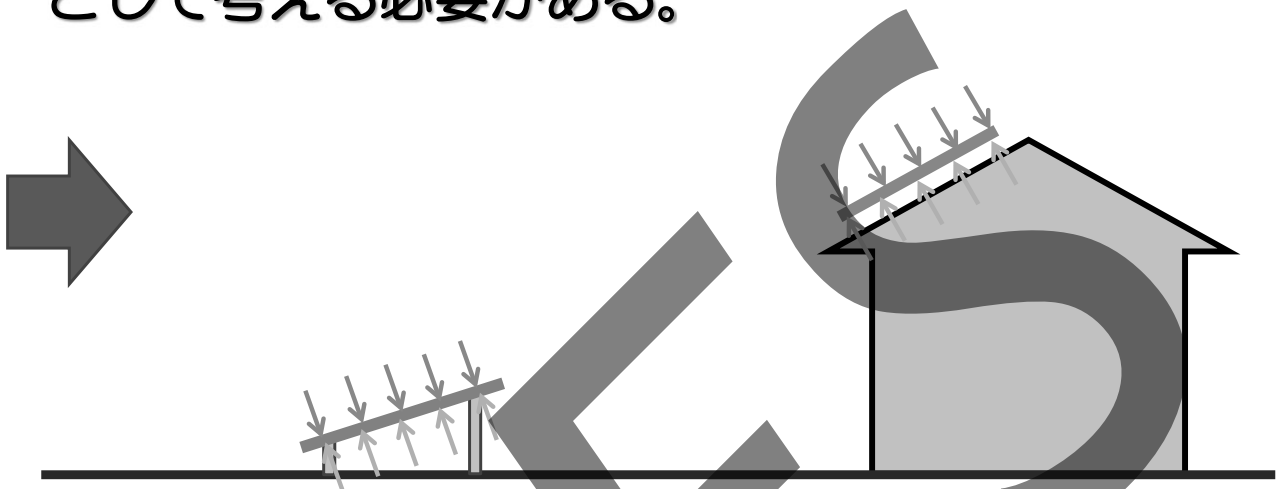
T : 再現期間(年)
 N : 供用年数

$T = 50$ 年, $N = 20$ 年 のとき $p = 0.67$

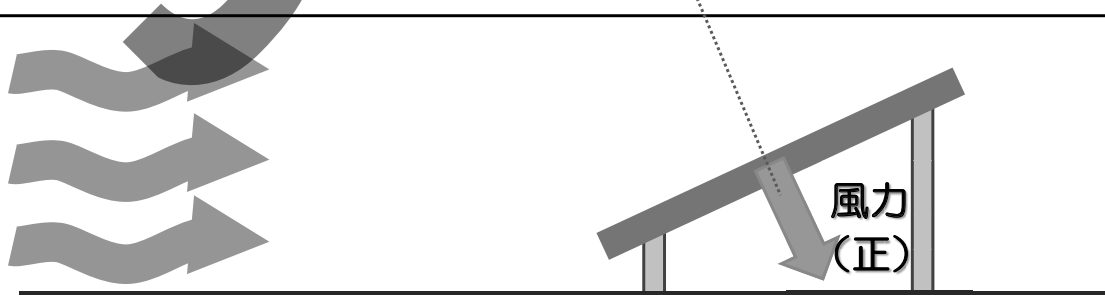
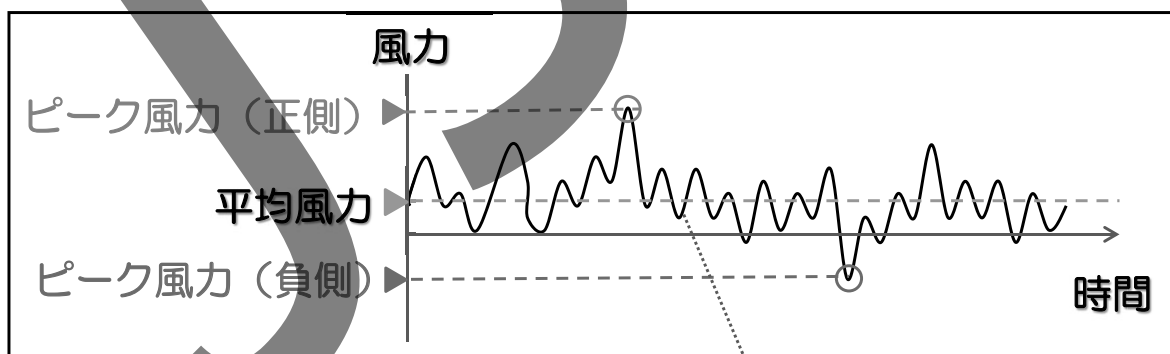
PVSの設計用風荷重の算定
(流れと風力の特徴, 風荷重評価の基本)

風圧と風力

- 太陽電池モジュールには上面だけでなく下面にも風圧が作用する。
- 太陽電池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。



平均風力とピーク風力



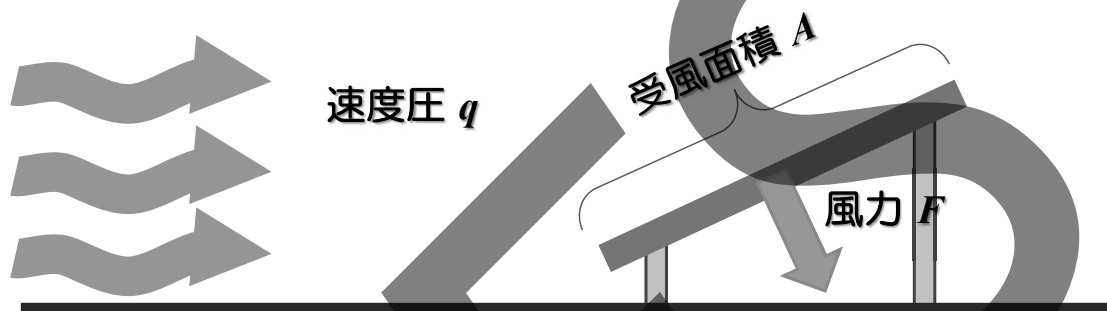
- 接近風の乱れなどにより、太陽電池に作用する風力は変動する
- 耐風設計ではピーク風力に対する安全性を確認する必要がある。

風力係数とは？

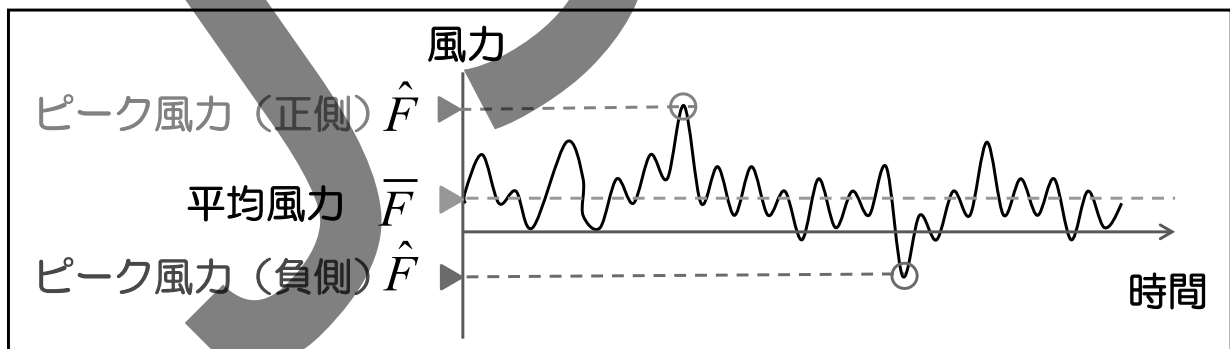
風力係数 C_f

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

F : 風力 [N], q : 速度圧 [N/m²], A : 受風面 [m²]



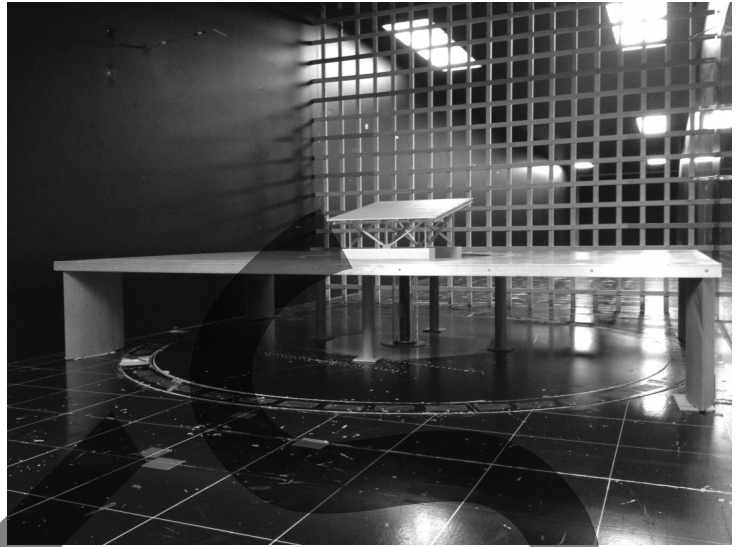
平均風力係数とピーク風力係数



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

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

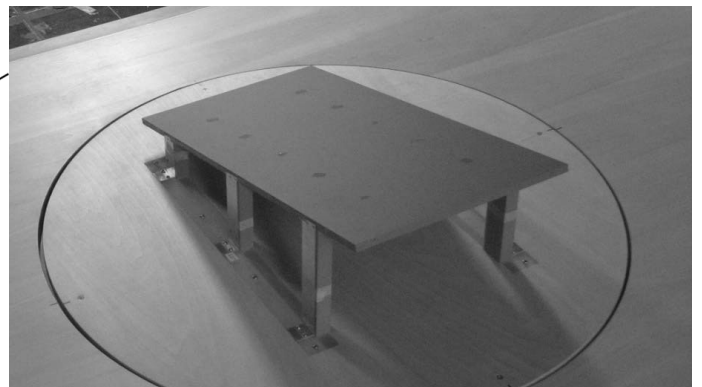
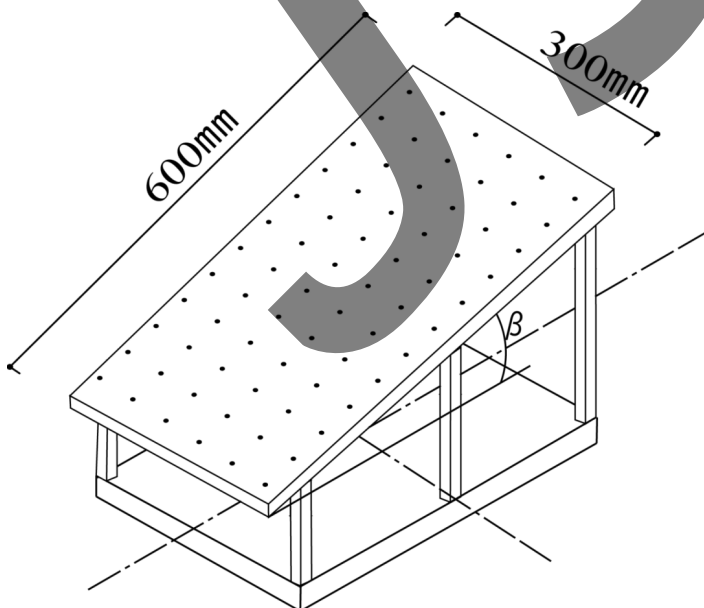
PVに作用する風力の測定方法(1)



分力計を用いた全体力の測定

(東京工芸大学提供)

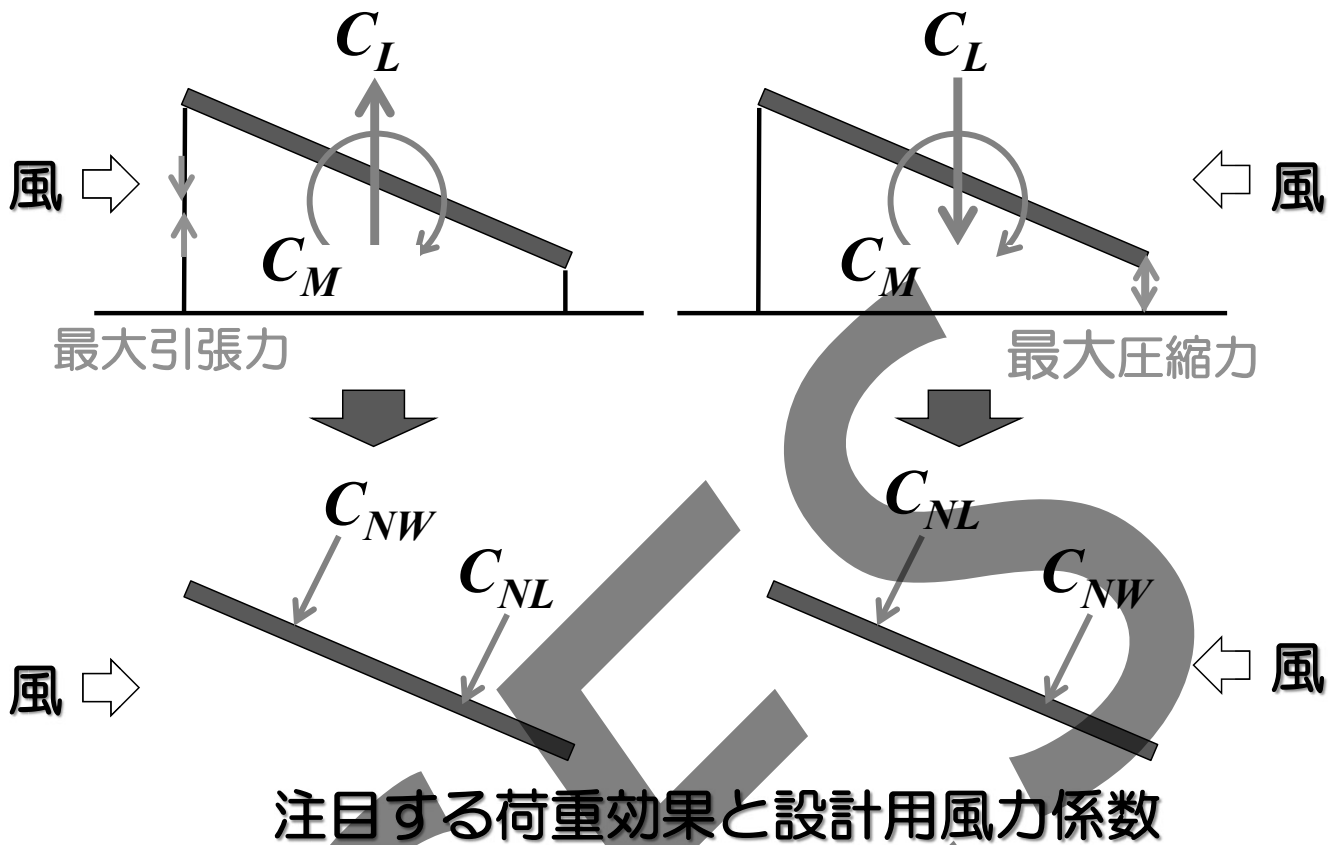
PVに作用する風力の測定方法(2)



多点風圧測定(上下面同時)

(東京工芸大学提供)

適切な風力係数の評価

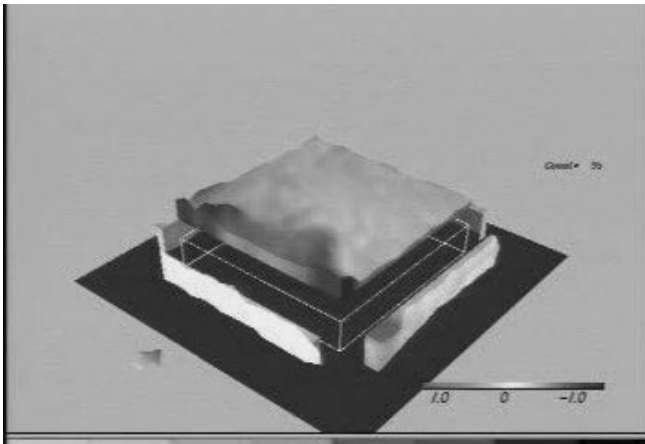


屋上設置型風力発電システム (陸屋根)

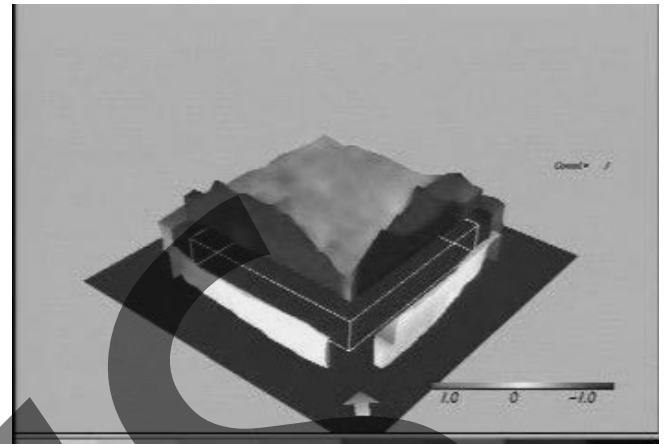


建物の影響大 ➡ 建物の規模, 形状,
PVの設置位置に応じた荷重評価

陸屋根建物に作用する風圧分布の可視化



風向0°の場合



風向90°の場合

風向，場所によって風圧の性状は大きく異なる

(提供：清水建設技術研究所)

屋上設置型風力発電システム (勾配屋根)



屋根とPVとの隙間の影響大

➔ 裏面圧の評価が重要
等圧効果による荷重低減

適切な設計風速の評価



傾斜地に建設されたメガソーラー発電所
地形の影響を適切に評価 ← 数値流体解析
(CFD)

設計用風荷重の評価方法

国交省と経産省の関連法規

国交省

建物設置の太陽電池

関連法規：建築基準法

- ・ 防火性能
- ・ 構造安全性能
など

耐風性能については、
構造骨組：告示第1454号
外装材：告示第1458号
が適用される。

経産省

地上設置の太陽電池

建物上設置の太陽電池

関連法規：電気事業法

- ・ 電气的性能
- ・ 構造安全性能
など

構造安全性能については、
JIS C8955を引用。

建築基準法での太陽光発電設備の取扱い

- 国住指4936号（平成23年3月25日）
 - 他の法規（電気事業法）により規制を受ける太陽光発電設備は、建築基準法施行令（第138条第1項）に示される工作物の指定からの除外。
 - 土地に自立して設置する太陽光発電設備（地上設置型PV）で、架台下の空間を居住、執務、物品の保管等の用途に供しない場合には建築物に該当しない。
- 国住指1152号（平成24年7月4日）
 - 建築物上に設置する太陽光発電設備（屋根置型PV）については、建築基準関連規定に適合する必要があるが、架台下の空間を居住、執務、物品の保管等の用途に供しない場合には、建築確認検査は不要。

国住指：国土交通省住宅局建築指導課長通知

建築基準法での設計風荷重に関する規定

- 平成12年建設省告示 第1454号
 - 建築物の構造骨組（柱，梁，基礎などの主要構造部）が対象。
 - 建築物全体に作用する風荷重分布を設定し，各部材（骨組）の構造安全性を確認する。
 - 風荷重は風向別に与える。

- 平成12年建設省告示 第1458号

- 建築物の外装材（屋根葺き材，外壁材など）が対象。
- 設計対象の外装材に作用する風荷重を設定し，外壁・屋根パネル，母屋・胴縁，各接合部材の構造安全性を確認する。
- 風荷重は，全風向中の最大値を与える。

-- 建築物上に設置される太陽光発電設備はこちらを適用するのが妥当

電気事業法での設計風荷重に関する規定

- 太陽光発電設備の設計風荷重はJIS C8955を引用
 - 電気事業法 ⇒ 電技 ⇒ 電技解釈 ⇒ JIS C8955と引用されている。
- JIS C8955での風荷重
 - 平成12年建設省告示第1454号と同様の風荷重算定式を用いている。
 - 太陽電池アレイの支持物用が対象。
 - 許容応力度設計用の荷重である。

風荷重の算定式

●平均風力係数 \bar{C}_f を用いる場合

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

・建築物の構造骨組風荷重
(H12年建告第1454号)

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

・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

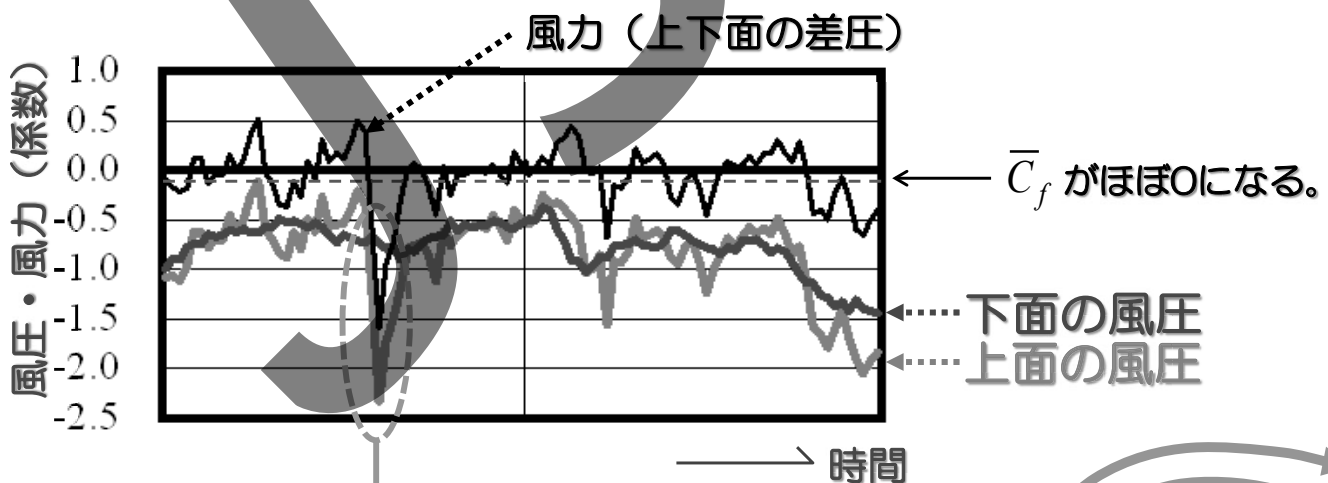
●ピーク風力係数 \hat{C}_f を用いる場合

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

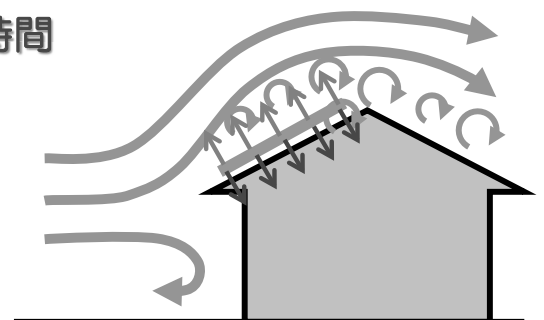
・建築物の外装材風荷重
(H12年建告第1458号)

G_f ：ガスト影響係数， q ：速度圧 [N/m²]， A ：受風面積 [m²]

平均風力係数 \bar{C}_f を用いる場合には注意が必要



- ・建物上に設置される太陽電池では、平均風力係数がほぼ0（ゼロ）になる場合においても、ピーク風力が大きい場合がある瞬間がある。



風荷重の算定式

- 平均風力係数 \bar{C}_f を用いる場合

$$\begin{aligned}\hat{F} &= \bar{C}_f \cdot \hat{q} \cdot A && \bullet \text{ 建築物の構造骨組風荷重} \\ & && \text{(H12年建告第1454号)} \\ &= \bar{C}_f \cdot \bar{q} \cdot G_f \cdot A && \bullet \text{ JIS C8955}\end{aligned}$$

平均風力係数が0に近い場合、風荷重のピーク値を過小評価する可能性がある。

- ピーク風力係数 \hat{C}_f を用いる場合

$$\hat{F} = \hat{C}_f \cdot \bar{q} \cdot A \quad \bullet \text{ 建築物の外装材風荷重 (H12年建告第1458号)}$$

ピーク風力係数を用いると、風荷重のピーク値を適切に算定することができる。

等価風力係数

- ピーク風力係数 \hat{C}_f をガスト影響係数 G_f で除した等価風力係数 \tilde{C}_f で表す場合。

$$\begin{aligned}\tilde{C}_f &= \hat{C}_f / G_f \\ &= \hat{F} / (\bar{q} \cdot G_f \cdot A)\end{aligned}$$

- 等価風力係数を用いることにより、JIS C8955での風荷重算定式に当てはめることができる。

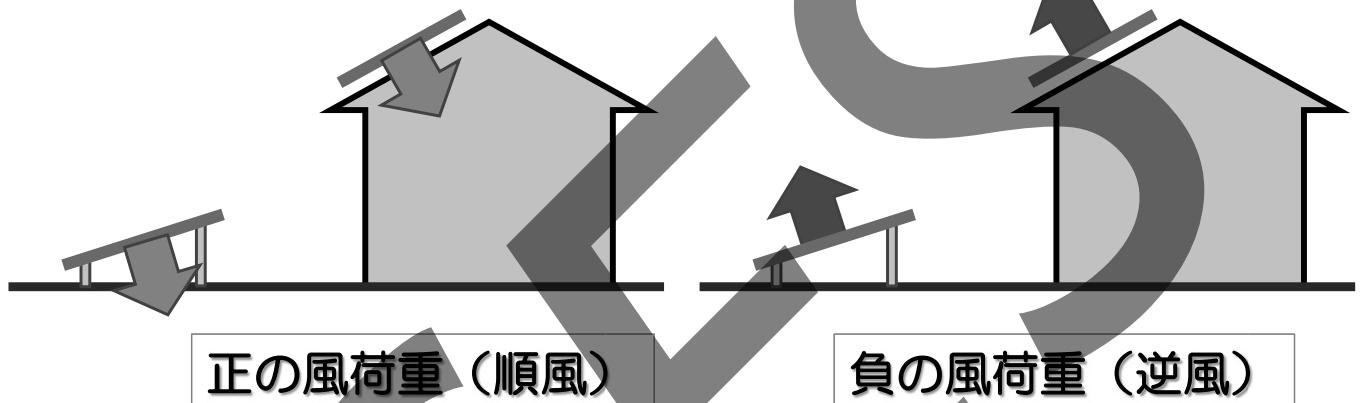
$$\hat{F} = \tilde{C}_f \cdot \hat{q} \cdot A$$

\hat{C}_f / G_f

$\bar{q} \cdot G_f$

風荷重の符号と荷重の向き

- モジュール上面を押す方向を正（+），引く方向を負（-）とすることが一般的。
- JIS C8955では，風荷重が正の場合を「順風」，負の場合を「逆風」と表現し，荷重は絶対値で与えている。
- モジュールの風荷重は，モジュール面に対して垂直に作用する。

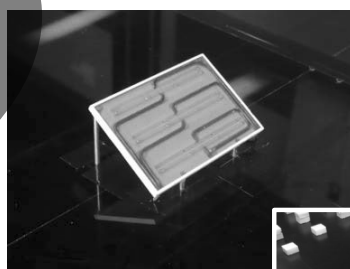
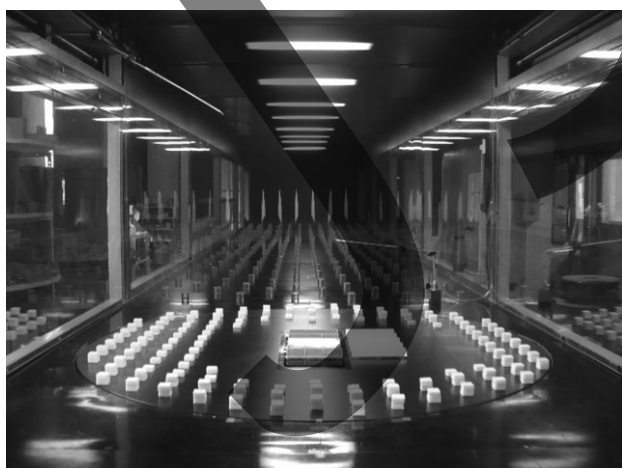


風力係数の設定

- JIS C8955や建築基準法では，風力係数の設定方法として，各基規準に示された数値を用いるか，風洞実験によって定めるとしている。
- 太陽電池の風力係数は，建築基準法には示されていないので，多くの場合JIS C8955に示された風力係数が用いられている。
- ところが，近年の研究事例では，JIS C8955に示された風力係数では，過小な風荷重を与えることが指摘されている。

風力係数に関する最近の研究事例

地上設置型太陽電池アレイの風力係数



日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）2013年8月

日本建築総合試験所 中川尚大, 高森浩治, 西村宏昭

本研究は平成24年度経済産業省委託事業（MRI再委託事業）である「太陽電池アレイ用支持物に関するJIS開発」および「太陽光発電システムに関する国際標準化」にて実施され、JEMAのアレイ支持物用規格標準化検討委員会（主査：日本大学・西川省吾教授）が検討を行なった成果の一部。

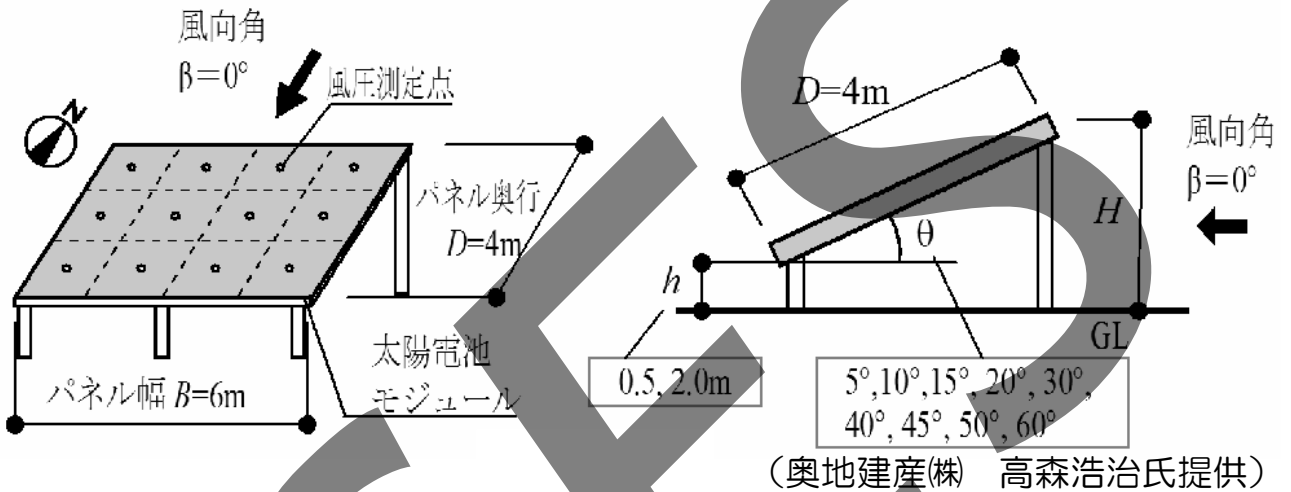
（奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

研究目的

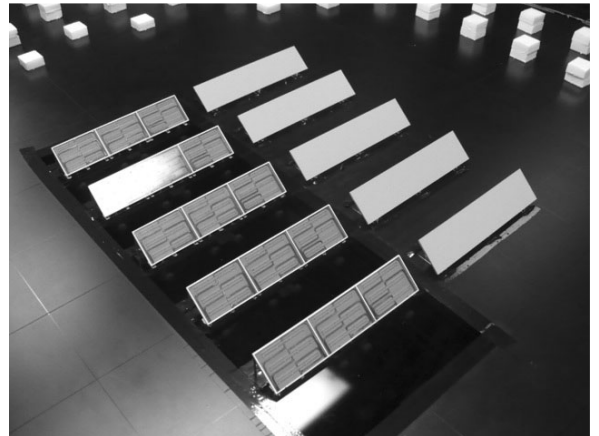
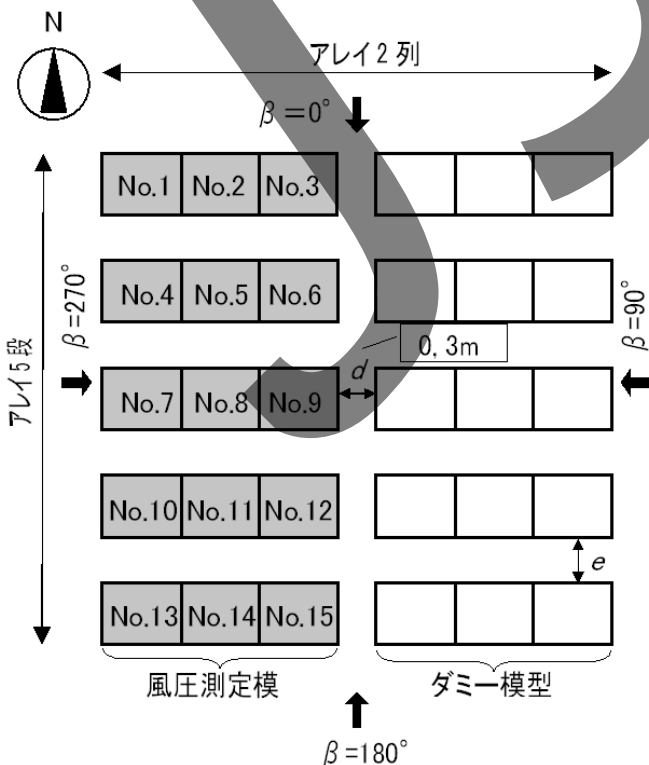
- 縮小模型を用いた風洞実験により、 $5^\circ \sim 60^\circ$ の広い勾配範囲についてパネル（アレイ）の風力係数を測定し、設計用風力係数を提供する。

パネルの大きさ	: 幅 B 6m×奥行 D 4m
パネルの勾配	: $5^\circ \sim 60^\circ$ の9段階
模型の縮尺	: 1/100
風洞気流	: 地表面粗度区分II相当
代表高さ	: パネル頂部高さ

パネル（アレイ）単独とアレイ群について検討



アレイ群の配置



(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

風力係数の定義

等価風力係数

ピーク風力係数をガスト影響係数で除した等価な風力係数

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

ピーク風力
(パネル全体で面積平均した風力)

↑ パネルのサイズは4m×6m

パネルの面積

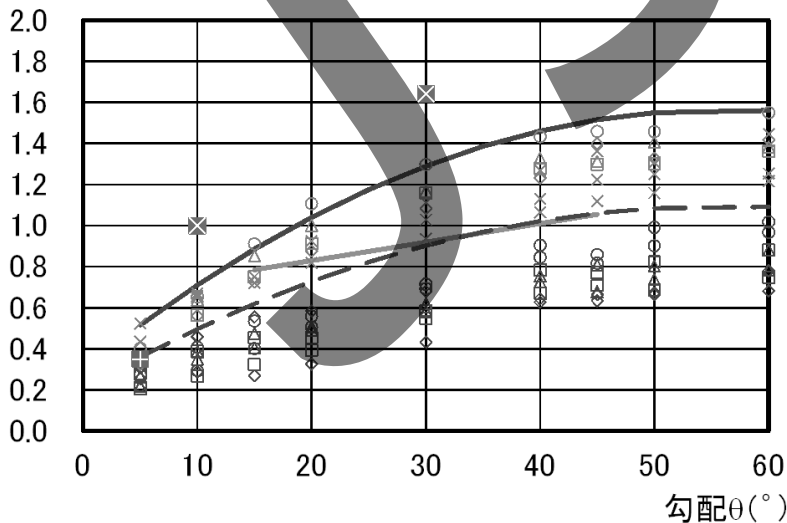
パネル頂部高さでの
平均速度圧

ガスト影響係数

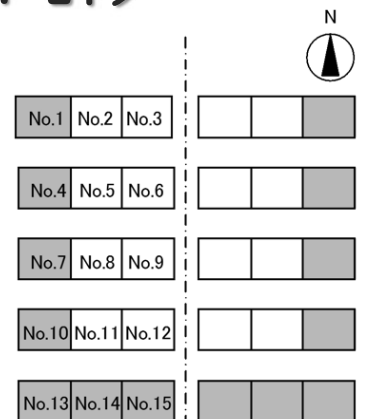
(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

等価風力係数の 全風向中の最大値 (アレイ群)

風力係数



- 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
- JIS C8955
- ⊠ 山本2)
- ⊞ 相原3)



□ 中央部パネル

■ 端部パネル

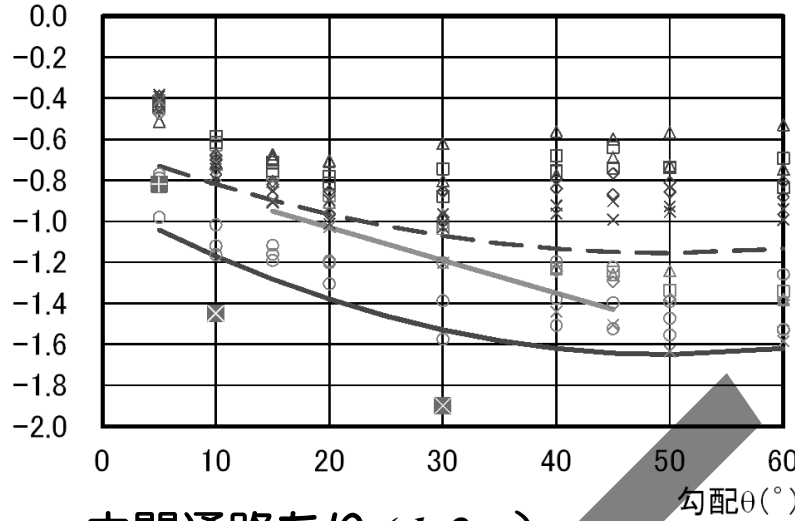
中間通路あり (d=3m)

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

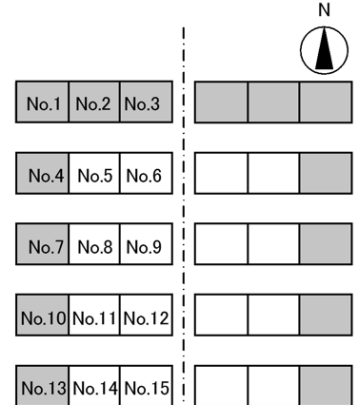
(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

等価風力係数の 全風向中の最小値（アレイ群）

風力係数



- 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



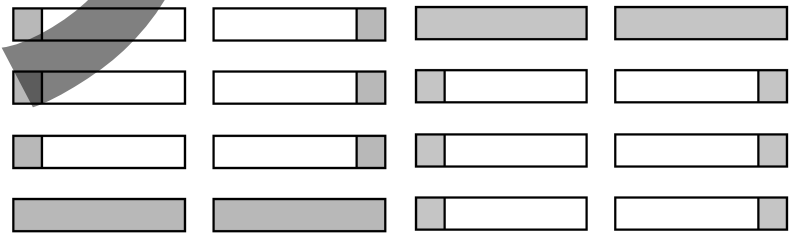
中間通路あり (d=3m)

- 負側（端部） : $C_{f, neg} = 0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9$
 - 負側（中央部） : $C_{f, neg} = (0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9) \times 0.7$
- （奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

設計用風力係数の提案値

現行JIS

風洞実験結果からの提案



正側

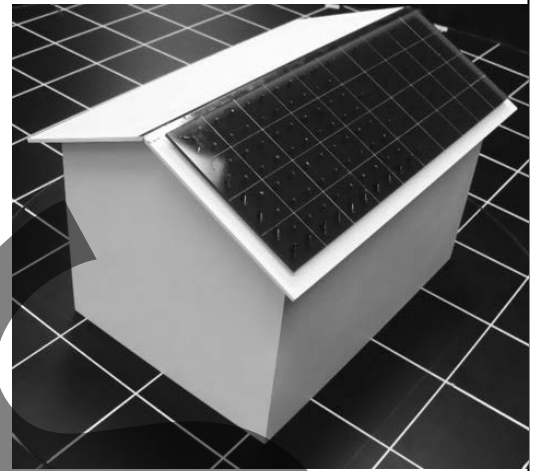
負側

□ 中央部パネル ■ 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） : $C_{f, pos} = (-0.0004\theta^2 + 0.045\theta + 0.3) \times 0.7$
- 負側（端部） : $C_{f, neg} = 0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9$
- 負側（中央部） : $C_{f, neg} = (0.0003\theta^2 - 0.03\theta - 0.9) \times 0.7$

（奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

切妻屋根設置形太陽電池モジュールの 風力係数



日本建築学会大会，2011年8月

日本建築総合試験所 高森浩治，中川尚大，西村宏昭

風工学研究所 中村 修，国総研 奥田泰雄，鹿島建設 山本学ほか

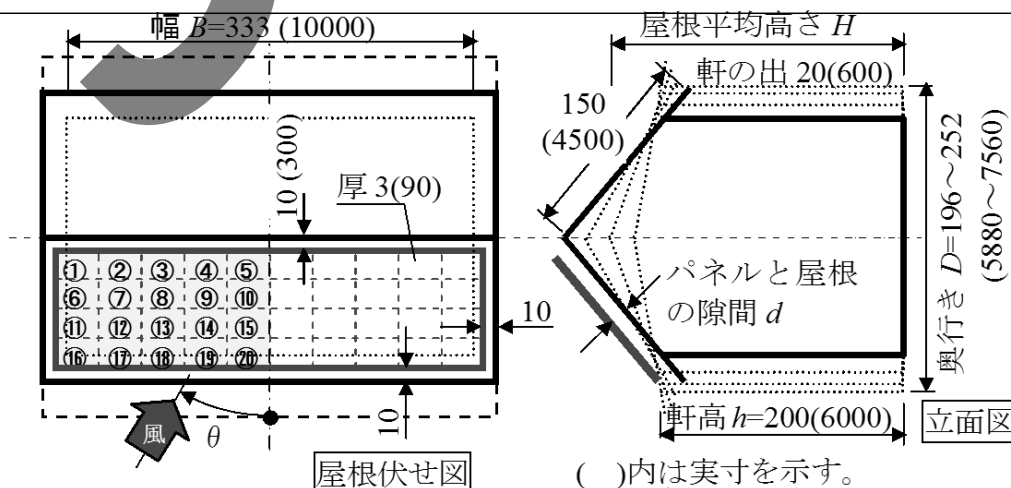
本研究は国土交通省の実施する平成22年度建築基準整備促進事業の一環として実施している事業のうち、「風圧力，耐風設計等に関する基準の合理化に関する調査委員会（風力係数WG）」の成果の一部。

（奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

研究目的

- 低層住宅の勾配屋根として一般的な切妻屋根上に設置される太陽光発電モジュールの設計用ピーク風力係数を風洞実験から得る。

- 2階建の住宅（幅10m×奥行き7m×軒高6m）を想定
- 模型縮尺：1/30
- 屋根勾配 β は10, 20, 24.2(4.5寸勾配), 30, 40°の5ケース
- パネルと屋根面の隙間高さ d は1, 3, 5mm(実寸30,90,150mm相当)の3ケース
- モジュール1枚あたり約1m²を想定



()内は実寸を示す。
（奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

風力係数の定義

- モジュール毎のピーク風力係数で定義

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

ピーク風力
 (1枚のモジュールで面積平均した風力)

↑
 モジュールのサイズは
 1.06m×0.96mを想定

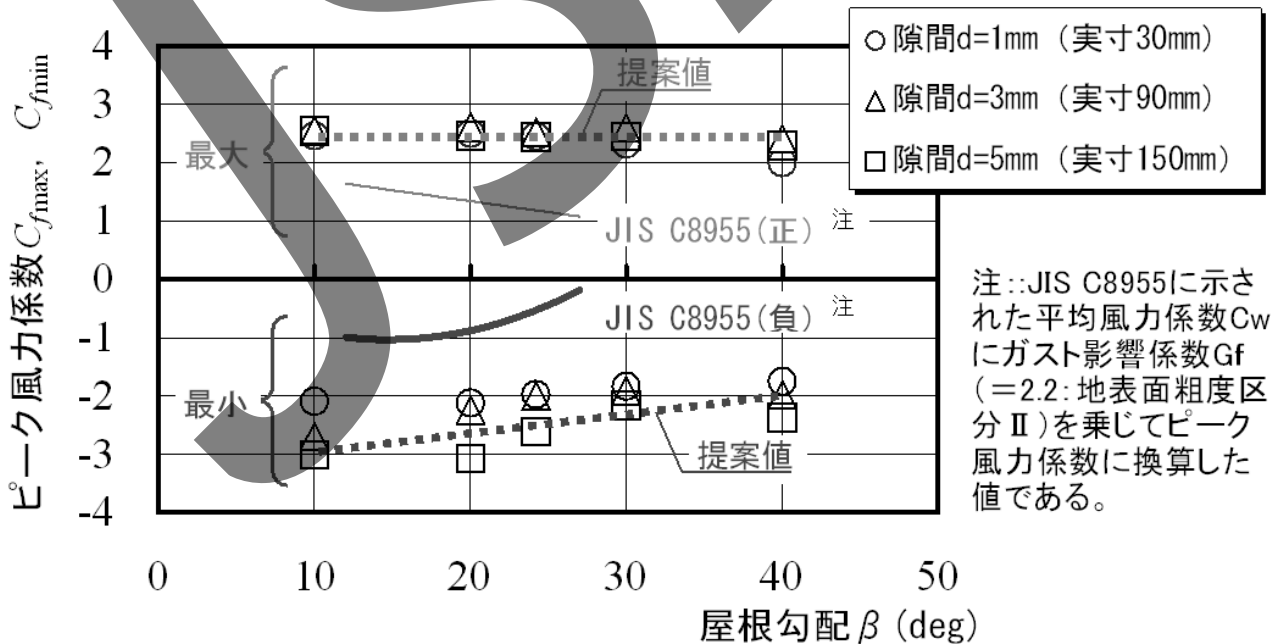
↑
 モジュールの面積 (約1m²)

建物の基準高さでの
 平均速度圧

↑
 建物の基準高さは
 屋根の平均高さ

(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

設計用ピーク風力係数の提案

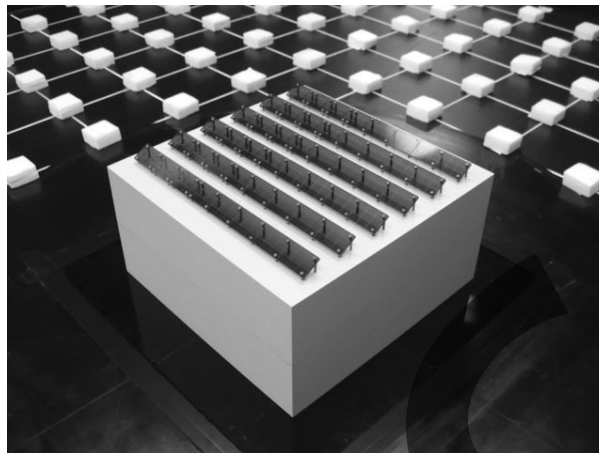


正側のピーク風力係数: 2.5 (屋根勾配に関わらず一定値)

負側のピーク風力係数: 屋根勾配10° で-3.0, 勾配40° で-2.0
 中間の勾配は直線補間した値

(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

陸屋根設置形太陽電池の風力係数



日本建築学会大会, 2015年9月

日本建築総合試験所 中川尚大, 高森浩治

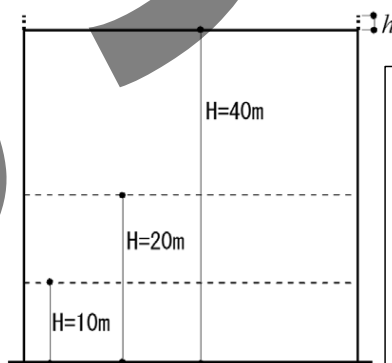
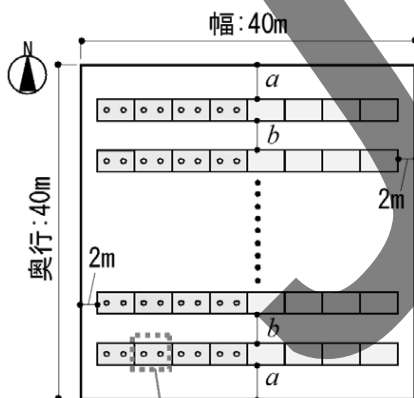
京都大学防災研究所 西村宏昭, 東京電機大学 河井宏允

本研究は平成26年度経済産業省委託事業（MRI再委託事業）である「太陽電池アレイ用支持物に関するJIS開発」および「太陽光発電システムに関する国際標準化」にて実施され、JEMAのアレイ支持物用規格標準化検討委員会（主査：日本大学・西川省吾教授）が検討を行なった成果の一部である。

（奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

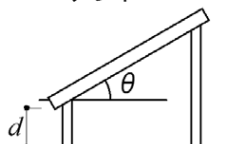
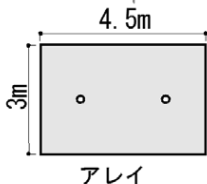
研究目的

- 低層～中層建築物を対象として、陸屋根上に設置される太陽光電池アレイの設計用等価風力係数を適切な風洞実験から得る。



アレイの設置間隔 a, b, d および列数

θ (°)	a (m)	b (m)	d (m)	アレイの列数
0	2.00	0.00	0.2	12
10	3.99	1.20	0.5	8
20	3.05	2.36	0.5	7
30	3.58	3.45	0.5	6
40	3.93	5.16	0.5	5
50	2.87	6.15	0.5	5
60	2.34	6.96	0.5	5

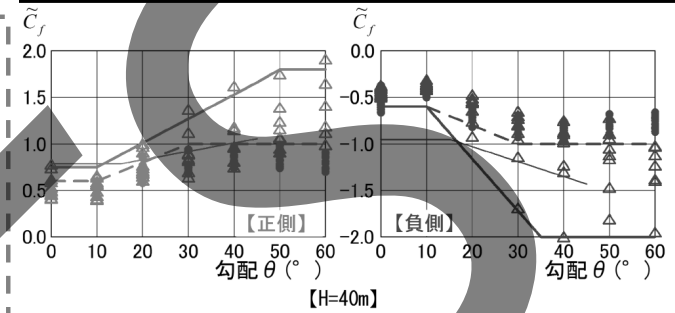
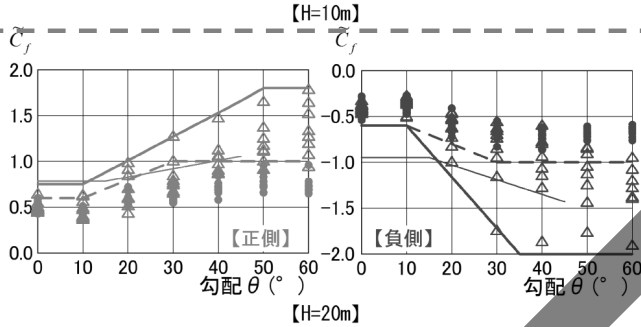
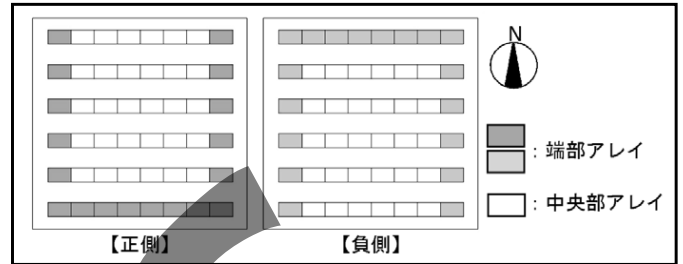
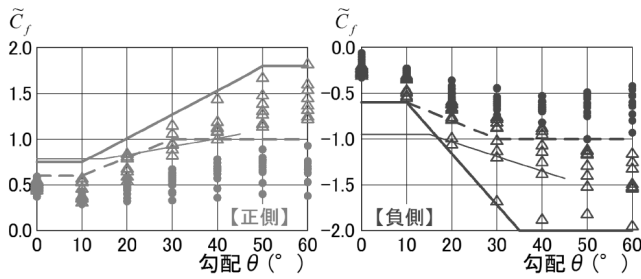


- 建築物の高さ：10, 20, 40m
- 模型縮尺：1/200
- アレイの大きさ：3×4.5m
- アレイ勾配 θ ：0～60° @10°
- アレイと屋根面の隙間高さ d ：
 $\theta = 0^\circ \Rightarrow d = 0.2\text{m}$
 $\theta = 10\sim 60^\circ \Rightarrow d = 0.5\text{m}$
- アレイの南北方向の間隔 b
アレイ日影が北側のアレイに及ばない距離

（奥地建産(株) 高森浩治氏提供）

等価風力係数の測定結果 全風向中の最大値，最小値

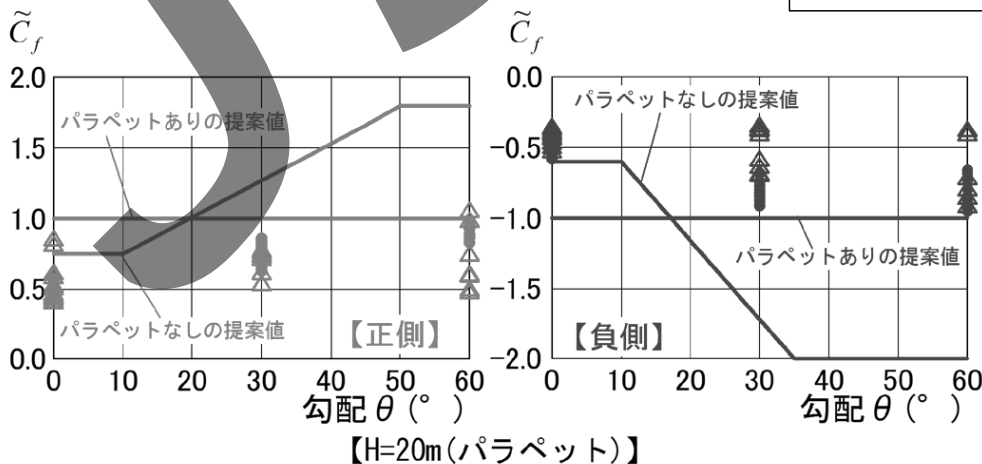
●, ●: 中央部アレイ
 △, △: 端部アレイ
 —: 端部アレイの提案値
 - - - : 中央部アレイの提案値
 —: JIS C8955



- アレイ勾配 θ の増加に伴い，等価風力係数は，正・負ともに増加傾向。
- 端部アレイの等価風力係数は中央部より大きい。
- JIS C8955の値は，勾配 θ が大きくなると正・負ともに測定結果を下回る。
- 建築物の高さ H の違いによる影響は小さい。(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

等価風力係数の測定結果 全風向中の最大値，最小値(パラペット有)

●, ●: 中央部アレイ
 △, △: 端部アレイ



- アレイ頂部と同じ高さのパラペットがある場合の設計用等価風力係数は，正側で1.0，負側で-1.0を設定することで概ね安全側の値となる。

設計用等価風力係数の提案値

陸屋根設置型太陽電池モジュールの 設計用等価風力係数の提案値

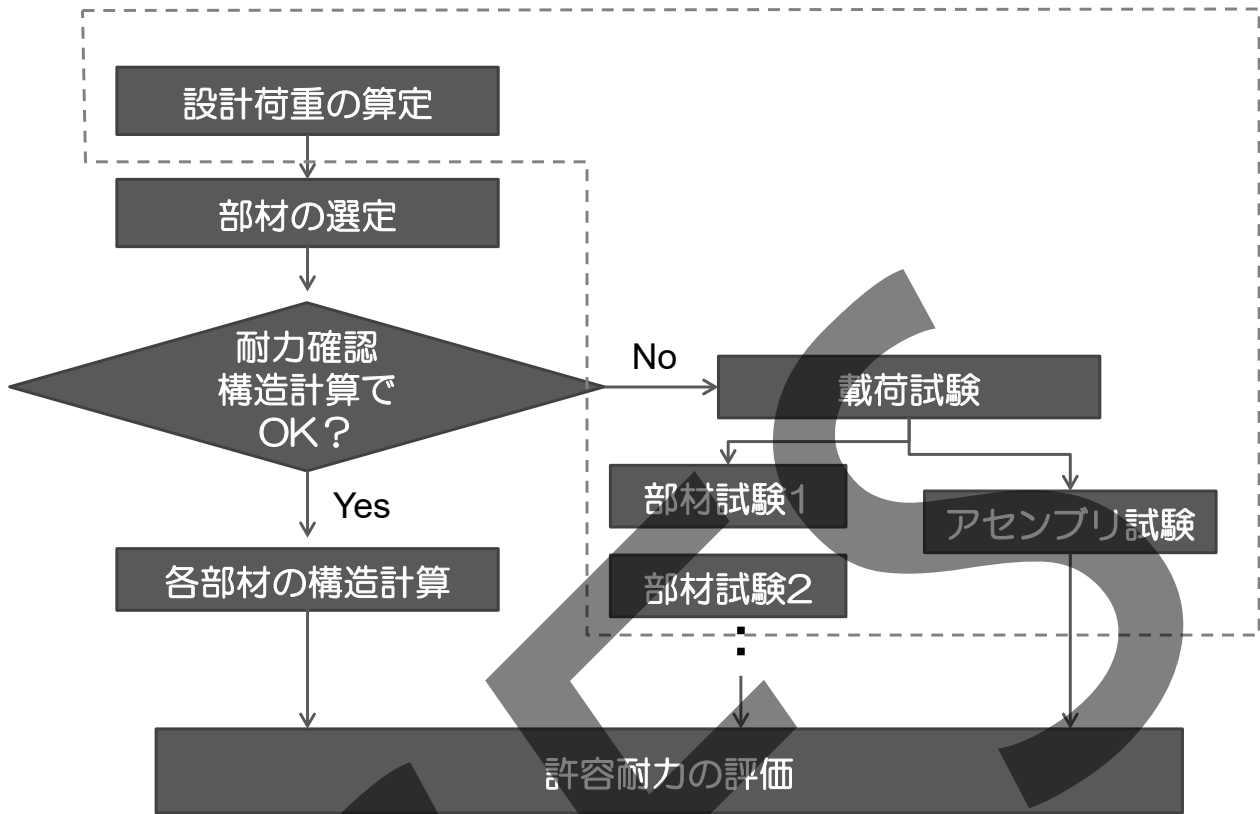
	アレイ勾配 θ (°)	端部アレイ	中央部アレイ
正	$0^\circ \leq \theta < 10^\circ$	0.75	0.6
	$10^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$	$0.49 + 0.026\theta$	$0.4 + 0.02\theta$
	$50^\circ < \theta \leq 60^\circ$	1.8	1.0
負	$0^\circ \leq \theta < 10^\circ$	-0.6	-0.6
	$10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$	$-0.04 - 0.056\theta$	$-0.4 - 0.02\theta$
	$30^\circ < \theta \leq 60^\circ$	-2.0	-1.0
パラペットあり* ($0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$)	正	1.0	
	負	-1.0	

*アレイの最高高さはパラペットの高さを超えないこと

(奥地建産(株) 高森浩治氏提供)

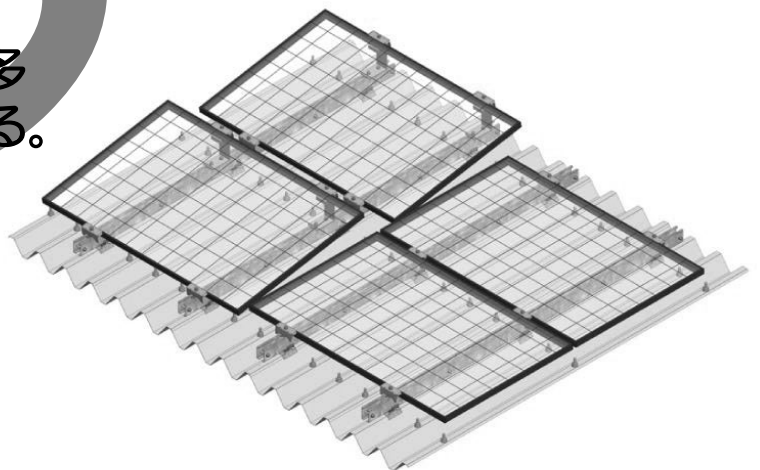
耐力評価における留意点

耐風設計のフロー



太陽光発電システムの構成

- 太陽光発電システムは多くの部材から構成される。
 - 太陽電池モジュール
 - フレーム
 - 取り付け金具
 - 架台・基礎

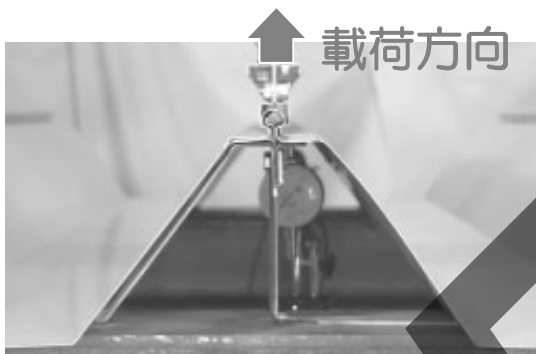


- 特殊な形状のフレームや金具が用いられる場合が多い。
- 特殊な工法で固定されることもある。

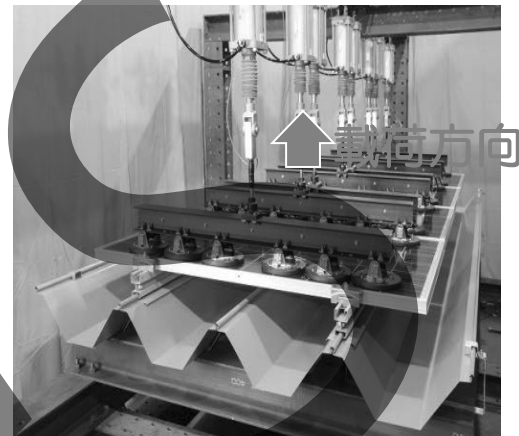
構造計算によって耐力評価がかなり大変？

载荷試験での耐力評価

- 構造計算で耐力評価することが難しい場合には、载荷試験等で耐力評価を行う必要がある。
- 载荷試験には、部分試験（部材試験）と、アセンブリ試験があるが、できればアセンブリ試験を実施することが望ましい。



部分試験の例
（折板屋根と固定金具）



アセンブリ試験の例

提供：奥地建産(株)

耐力評価のための载荷試験の事例

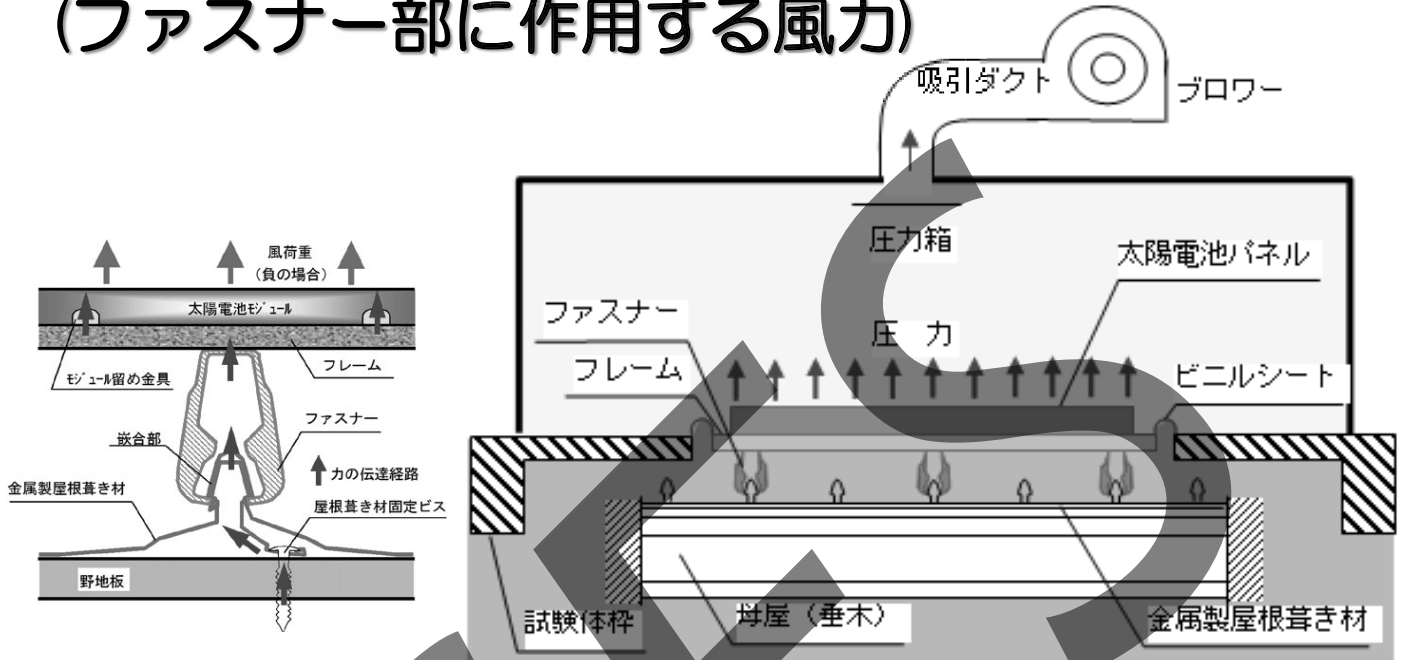
金属屋根上に設置される太陽光発電システムの耐風圧試験（アセンブリ試験）



提供：(株)島屋

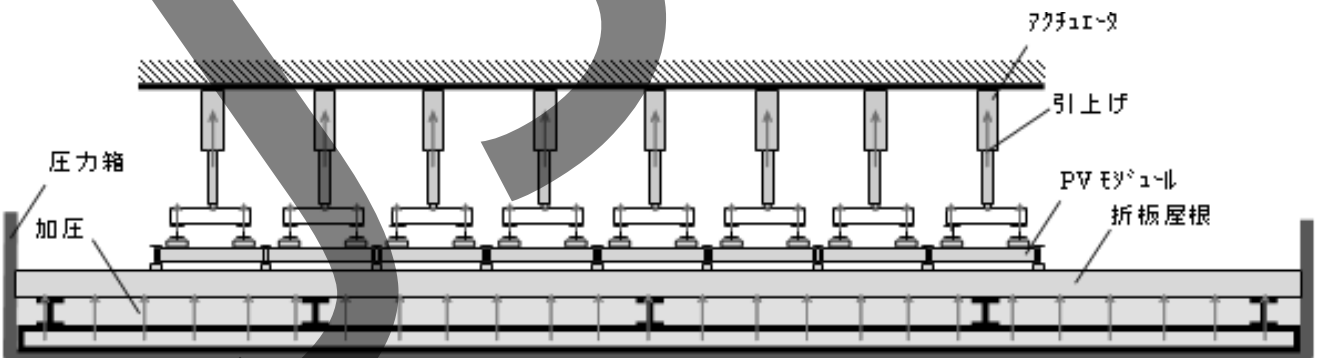
耐力評価のための载荷試験の事例

折板上のPVS (ファスナー部に作用する風力)



提供：奥地建産(株)

耐力評価のための载荷試験の事例



折板上のPVS (折板に作用する風力)



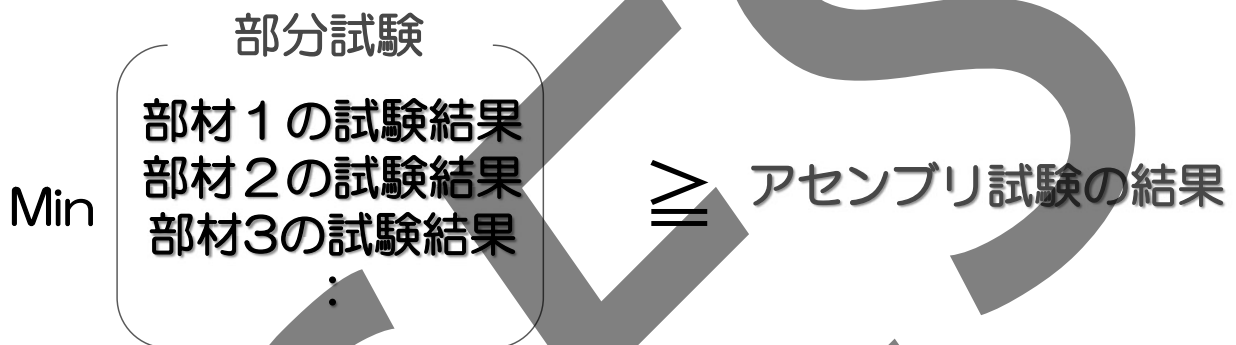
提供：奥地建産(株)

部分試験とアセンブリ試験の差

- 部分試験の結果を組合わせて耐力評価を行った結果は、アセンブリ試験の結果より大きくなる場合がある。
(力の流れ、荷重負担面積が正しく評価されていない)



- 部分試験の組合せでは、過大に耐力評価される場合があることに注意する必要がある。

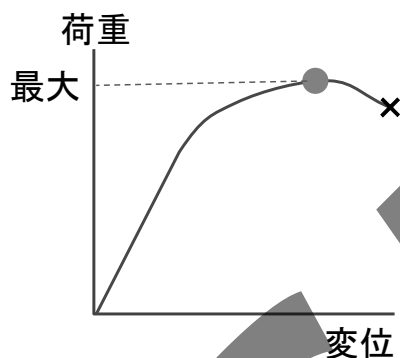


JIS C8955での荷重評価の位置づけ

- JIS C8955では、許容応力度設計を前提としており、同JISによって算定される荷重は、限界耐力でなく許容耐力の評価に用いられることが基本である。
- 許容耐力とは、その荷重を受けた場合においても、部材が損傷することなく、その後も支障なく使用できる耐力（荷重）をいう。

最大耐力から許容耐力を決定する方法

- 許容耐力は最大耐力を安全率で除してを求める。
- 安全率は、耐力のばらつきなども考慮して、通常1.5~3.0で設定されることが多い。（建築物の外装材の場合）
- 部分試験では、アセンブリ試験より仮定条件が多いので、部分試験結果の組合せで耐力評価を行う場合には安全率を大きめに設定されることが一般的である。



$$P_a = \frac{P_{\max}}{a}$$

P_a : 許容耐力

P_{\max} : 最大耐力

a : 安全率

風重設定における課題

- JIS C8955の改定
 - 現行JISでは過小な風荷重が与えられる場合がある。
- 風力係数のデータの充実
 - 傾斜地に設置される場合や基本的な形状でない建築物に取付けられる場合の風力係数のデータが少ない。
- 付属物が風荷重に与える影響の把握
 - ケーブルラック、接続箱などの付属物が風荷重に与える影響が把握されていない。
- 荷重レベルの位置づけ明確化
 - 許容耐力レベル、限界耐力レベルの位置づけを明確にする必要がある。

耐風設計における課題

- 耐風設計ガイドの整備
 - 構造設計の方法や事例などを示した資料の整備が必要。
- 太陽電池モジュールの耐風性能の表示
 - 許容耐力，限界耐力が明示されていないものが多い。
- 性能確認試験方法の提案
 - 耐風性能評価のための载荷試験方法が明確でない。
- 農地利用の太陽光発電設備の扱い
 - 簡易的な設置（容易に撤去できること）を前提とした農地利用の太陽光発電設備の耐風設計をどうすべきか。
- 保守点検計画の重要性の説明
 - 施主（事業主）に対して，保守点検の計画を提示するとともに，その重要性を説明する。

社会システムにおける課題

- 建築物と同様のシステムの整備
 - 有資格者による構造設計（あるいは構造計算の確認）。
 - 第三者による確認検査の実施。
- 被害発生時の報告義務の厳格化
 - 構造的欠陥を明確にし，情報を共有することによって性能の向上を図る。
- 損害保険の適用基準の明確化
 - 設計・施工の手抜きなどが明確な場合，保険金の支払停止も必要かも。

ご清聴ありがとうございました。

謝辞：本講演で使用したスライド，写真，図表の多くは，
奥地建産(株)・奥地誠氏および高森浩治氏，並びに，(有)吉富電気・吉富政宣氏より
提供頂きました。
ここに記し，感謝の意を表します。