

## 風工学において望ましい 太陽光発電システムの位置づけ

東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻

植 松 康

### PVに要求される耐風性能

- 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

### 本日の講演内容

- 太陽光発電システムに要求される耐風性能
- 太陽光発電システムの風荷重評価方法概説
- 太陽光発電システムの風力係数評価：留意点
- 「太陽光+風力」ハイブリッド発電システム

### 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

$$p = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad T: \text{再現期間(年)} \\ N: \text{供用年数}$$

$T = 50, N = 20$  のとき  $p = 0.67$

## 各種構造物の耐風設計

- 建築物、工作物 → 国土交通省  
建築基準法、各種規準・指針、工法標準
- PV、カーポート等 → 経済産業省  
JIS
- 農業施設(ハウス、畜舎等) → 農林水産省  
施設園芸協会の指針等

縦割り行政の弊害

## バス停とカーポート ～似て非なるもの～



バス停留所



カーポート

## 倉庫と園芸用鉄骨ハウス ～似て非なるもの～



倉庫

園芸用鉄骨ハウス

## 各種構造物の耐風設計

倉庫と園芸用鉄骨ハウス  
バス停留所とカーポート  
...

作用する風荷重には大差はない。→ 適切な荷重評価  
安全性は耐力サイドで考慮する(安全率、用途係数)

設計基準、安全性に対する考え方の調和が必要

人間の滞留時間  
被害のインパクト(経済的、社会的)など

## 空飛ぶ凶器～飛散物



(北海道新聞)

損傷しても飛散させない  
ことが最も重要

9

0418号台風・北海道

## 強風被害のインパクト



台風0406号の強風で近江八幡市の  
ホテルの屋根(9m×41m, 総重量  
7t)が飛散。

新幹線架線に掛かり、7時間にわたり  
不通。→ 損害賠償請求

10

## 飛散物による被害の拡大

### 被害の連鎖



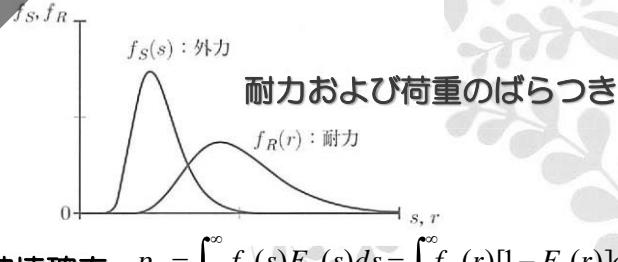
(東京工芸大学・田村幸雄教授)



(建築研究所・喜々津氏提供)

11

## 適切な耐風設計・耐風性能評価



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

▼  
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

12

## 太陽光発電システムの耐風設計における風荷重評価

- 太陽光発電システムの特徴
- 風荷重評価における課題

13

### 設計風速

$$U_H = U_0 \cdot K_D \cdot E_H \cdot k_{rW}$$

$U_0$  : 基本風速 (m/s)

地表面粗度区分 II, 再現期間100年の値

$K_D$  : 風向係数

$E_H$  : 風速の鉛直分布を表す係数の高さ  $H$ での値  
地表面粗度区分, 基準高さ  $H$

$k_{rW}$  : 再現期間換算係数  
100年 → 任意の再現期間  $R$  年

15

風工学において望ましい太陽光発電システムの位置づけ

### 設計用風荷重(AIJ荷重指針2004)

$$W = q_H \times C_f \times G_f \times A$$

$q_H$  = 設計用速度圧 ( $=1/2\rho U_H^2$ ) (N/m<sup>2</sup>)

$U_H$  = 設計風速 (m/s)

$H$  = 基準高さ (m) 地上設置型：最高高さ  
屋上設置型：屋根平均高さ

$A$  = 受圧面積 (m<sup>2</sup>)

$C_f$  = 風力係数 ( $=C_{pU} - C_{pL}$ ) ↬ 上下面の差圧

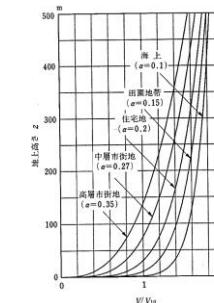
$G_f$  = ガスト影響係数

風力の動的荷重効果を適切に考慮する。  
荷重効果の最大・最小ピーク値を再現できる。

### 風速の鉛直分布係数

$$E = E_r \cdot E_g$$

$E_r$  平坦とみなせる状態での鉛直方向分布係数



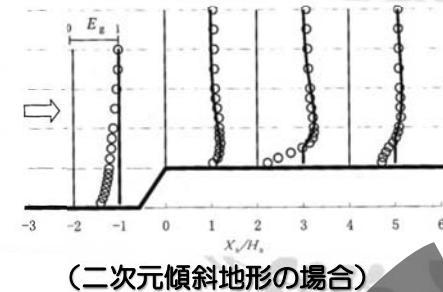
地表面粗度区分 II  
地上高さ10mの  
風速を1とする。

16

## 風速の鉛直分布係数

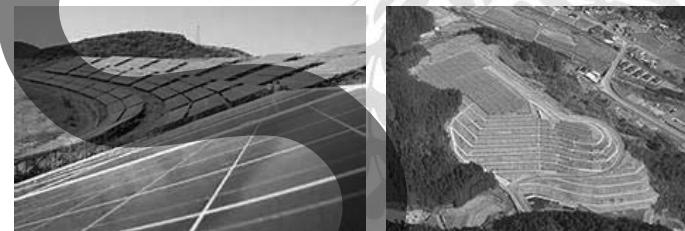
$$E = E_r \cdot E_g$$

$E_g$  小地形による風速の割増係数



17

## 適切な設計風速の評価

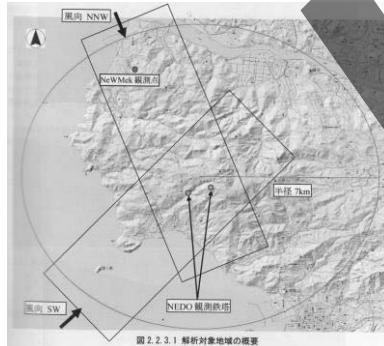


傾斜地に建設されたメガソーラー発電所  
地形の影響を適切に評価

← 数値流体解析  
(CFD)

18

## 数値流体解析(CFD)の利用

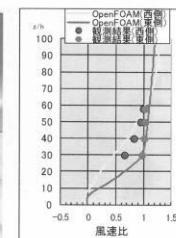
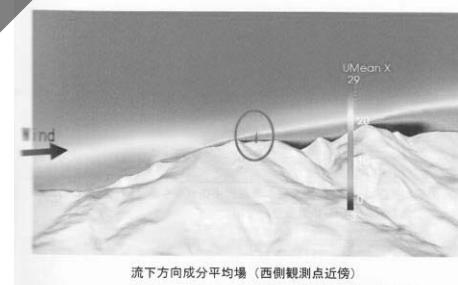


解析対象地域：  
鹿児島県いちき串木野市周辺  
NEDO次世代風力発電技術開  
発事業での観測サイト

(平成24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資する検討 報告書)

19

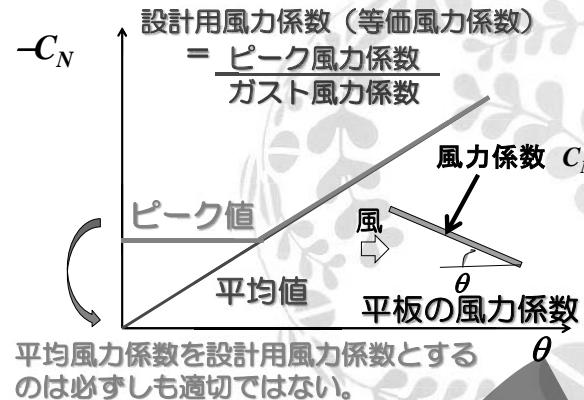
## 数値流体解析(CFD)の利用



20

風工学において望ましい太陽光発電システムの位置づけ

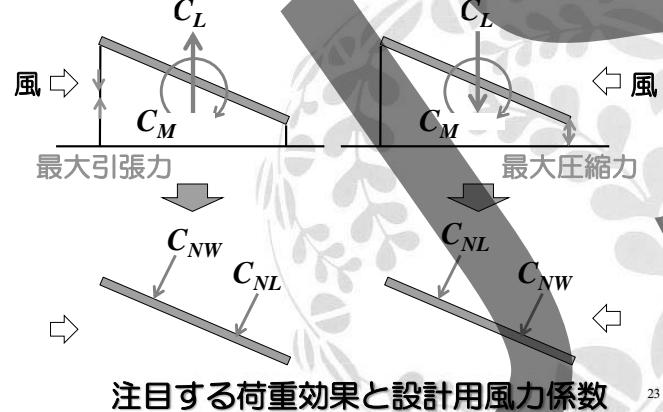
## 適切な風力係数の評価



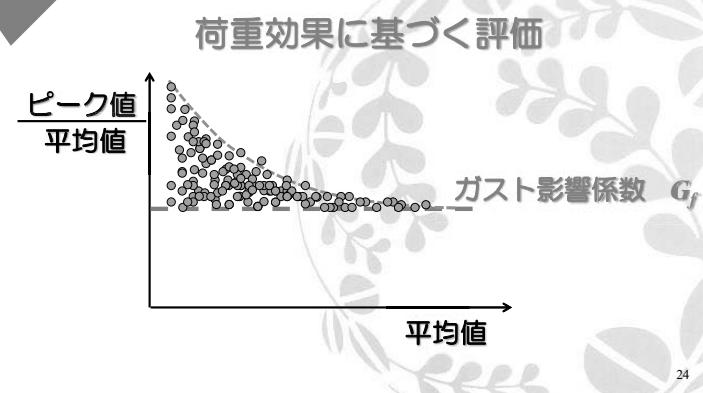
## 地上設置型太陽光発電システム



## 適切な風力係数の評価



## 適切なガスト影響係数の評価



## 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

## 屋上設置型風力発電システム (勾配屋根)



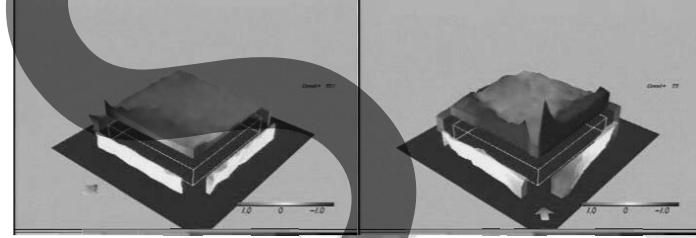
屋根とPVとの隙間の影響大

→ 裏面圧の評価が重要  
等圧効果による荷重低減 27

風工学において望ましい太陽光発電システムの位置づけ

## 陸屋根建物に作用する風圧分布 の可視化

(提供：清水建設技術研究所)



風向0°の場合

風向90°の場合

屋上設置型と地上設置型では、PVまわりの流れ  
は大きく異なることに注意！

## 太陽光発電システムの 風力係数の評価方法

- 1 風洞実験
- 2 数値流体計算 (CFD)
- 3 実測

## 一般的な風洞実験での気流の相似

### ■平均風速のプロファイル

$$U_z = U_G (z / z_G)^\alpha$$

### ■乱れの強さのプロファイル

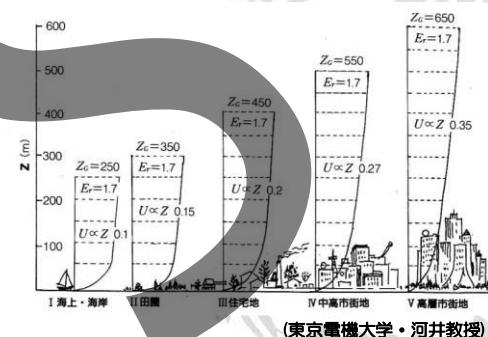
$$I_z = 0.1 (z / z_G)^{-\alpha - 0.05}$$

### ■乱れのスケール

$$L_{xz} = 100(z / 30)^{0.5}$$

## 平均風速のプロファイル

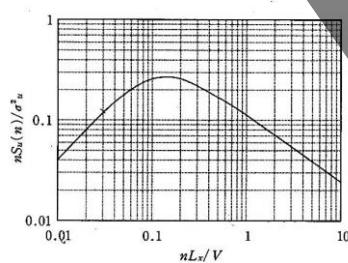
地表面粗度区分が大きくなるほど $\alpha$ および $Z_G$ は増大



(東京電機大学・河井教授)

30

## 乱れのスケール



変動風速のパワースペクトル

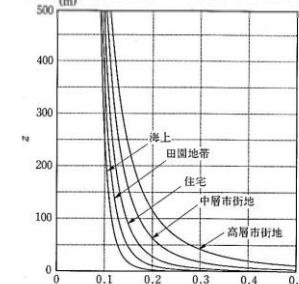
$$\text{カルマン型スペクトル} \\ \frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4n^*}{(1 + 70.8n^{*2})^{5/6}}$$

$$n^* = nL_{ux} / U$$

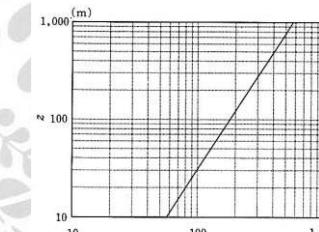
乱れのスケール  
 $(U / n)_{\text{peak}} = 6.87 L_{ux}$   
 (平均的な渦の大きさ)

## 乱れの強さとスケールのプロファイル

地表面粗度区分が大きくなるほど乱れの強さは増大  
 乱れのスケールは地表面粗度区分に依存しない



乱れの強さ



乱れのスケール

32

## 低層・小規模構造物の風洞実験

- 平均風速のプロファイル(べき指数 $\alpha$ )  
影響小さい → 相似条件の緩和
- 乱れの強さ → 影響大きい  
一様流での実験は現象を正しく反映しない
- 気流と模型の幾何学的縮尺率の不一致  
乱れのスケールに基づく  
気流の縮尺率 1/200~1/500程度  
模型の縮尺率 1/50程度  
一致させることは必要か? No!

## 乱れのスケールに対する条件

H.W. Tielemans et al. (1998), JWEIA, Vol.74 - 76

$$(1) L_{x,m} > 0.1L_x \text{かつ } L_{x,m} > 2L_B$$

$L_{x,m}$  : 風洞気流の乱れのスケール

$L_x$  : ターゲットとする自然風の乱れのスケール

$L_B$  : 模型の代表寸法

$$(2) S = \frac{n_s S_u(n_s)}{\sigma_u^2} \left( \frac{\sigma_u}{U} \right) \times 10^6 > 300, n_s = \frac{10U}{L_B}$$

Small-scale spectral density parameter

34

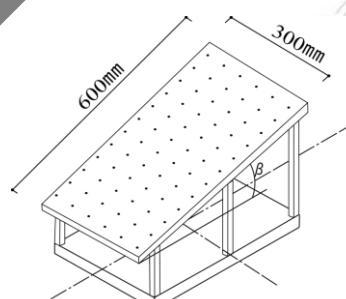
## PVに作用する風力の測定方法(1)



### 分力計を用いた全体力の測定

(東京工芸大学提供)<sup>35</sup>

## 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)<sup>36</sup>

## 風力測定方法の比較

### 多点風圧測定

- ・風圧・風力分布を求めることができる。  
→ PV自体の設計に利用可能
- ・同位置における上下両面の風圧を測定しなければならない。  
→ 模型の厚さ大。多数の導圧管が必要  
→ PVまわりの流れの歪み
- ・全体風力は積分により算定  
→ 限られた測定点数では精度が悪い。

### 分力計による測定

- ・全体力(揚力、抗力、空力モーメント)の測定  
→ 架台や支持部の設計
- ・模型の厚さ小。支持部材が流れに及ぼす影響小
- ・風力分布を求めることができない。

37

## 模型の厚さが流れに及ぼす影響

薄い場合

厚い場合

模型の厚さは、相似にできない場合、できるだけ薄い方が良い

38

## 屋根設置形PV(カナダの例)



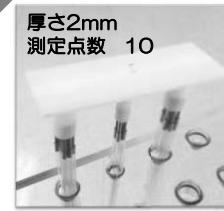
一般的なレールシステム

屋根とPV下面間の隙間、パネル間の隙間

パネルに作用する風力(上下面の差圧)

39

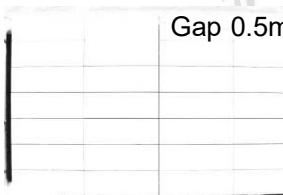
## 等圧効果による荷重低減(UWO)



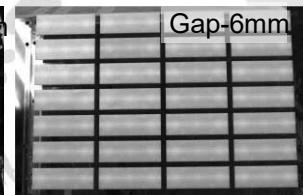
厚さ2mm  
測定点数 10

パネル下面と屋根面の隙間  
を調整可能

パネル間の隙間の影響討



Gap 0.5mm



Gap-6mm

40

## 風洞実験の様子(UWO)

等圧効果による風力の低減を確認

設置高さが高く、配置間隔が狭い時に、負の風力は減少  
風力係数は外圧係数の 65%~85%

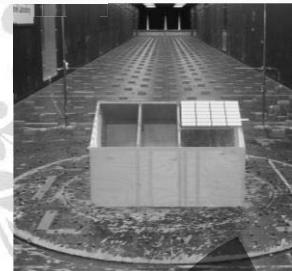
### 切妻屋根住宅モデル

縮尺 1 : 20

30° 傾斜屋根

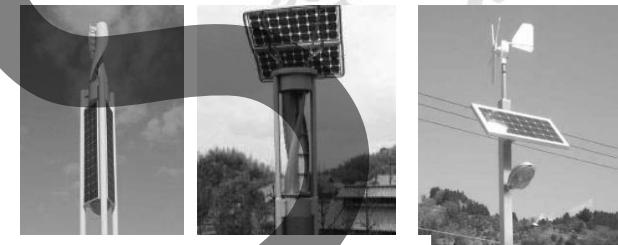
平面 12.5m × 15m  
(62.5cm × 75cm)

平均屋根高 7.8m (39cm)



41

## 太陽光・風力 ハイブリッド発電システム



従来型

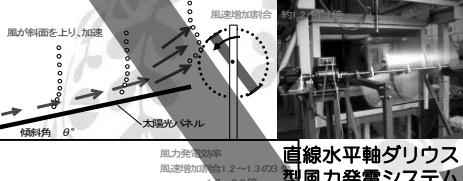
42

## 太陽光・風力 ハイブリッド発電システム

### 風力エネルギー

$$E = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

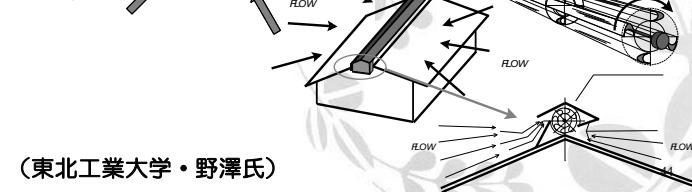
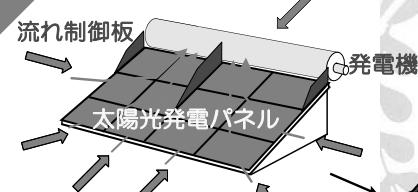
WIND



太陽光発電システム

新しい提案 (東北工業大学・野澤氏)  
太陽光発電パネルによる增速  
風力発電システム  
風車後方の風速低減効果・風環境改善

## 太陽光・風力 ハイブリッド発電システム



(東北工業大学・野澤氏)