

# PVシステムへ加わる荷重 -風荷重について-

東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻

植松 康

## 農地太陽光発電システムにおける 耐風設計上の留意点

農地太陽光発電システムの特徴

通常のPVシステムと比べて

- 設置高さが高い
  - アレイ間の設置間隔が広い  
(遮蔽効果が小さい)
  - 架台の基礎が軽微
- ➡ 大きな風荷重が作用
- ➡ 揚力・転倒モーメントによる引き抜き

# 太陽光発電システムの風荷重計算 (建築基準法に準拠して)

構造骨組用風荷重

$$W_f = q \cdot C_f \quad (\text{N/m}^2)$$



架台の設計

$q$  : 速度圧

$C_f$  : 風力係数

外装材用風荷重

$$W_c = \bar{q} \cdot \hat{C}_c \quad (\text{N/m}^2)$$



モジュール, サ  
ブアレイの設計

$\bar{q}$  : 速度圧

$\hat{C}_c$  : ピーク風力係数

## 風荷重はなぜ2種類あるのか？

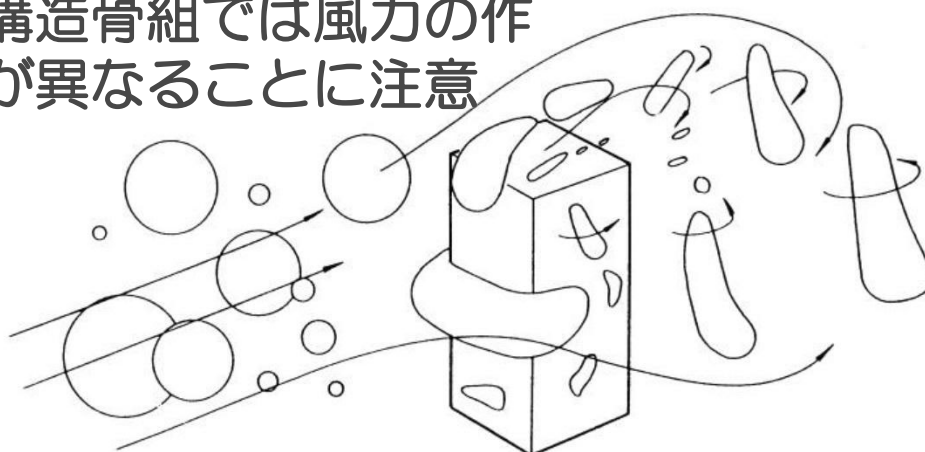
外装材

構造骨組

小 ← 規模 → 大 規模効果による  
荷重低減

高 ← 剛性 → 低 共振効果による  
荷重増大

外装材と構造骨組では風力の作用の仕方が異なることに注意



# 風荷重はなぜ2種類あるか？

- 外装材用 → 狭い領域に作用するピーク風力係数の全風向中の最大値に基づき設定
- 構造骨組用 → 構造物全体に作用する風力の最大値に基づき設定 (特定の風向)

# 風荷重評価のポイント 1

## 設計風速(速度圧)の評価

- 基準風速
- 地表面粗度区分
- 再現期間
- 小地形の影響

# 設計風速の評価

$$V = V_0 \cdot E_r$$

基準高さ(屋根平均高さ)での10分間平均風速

$V_0$  : 基本風速(各地域における開けた平坦地における地上10mでの10分間平均風速の再現期間50年に対する値(30~46m/s))

← 気象データの統計解析, 過去の風害記録

$E_r$  : 平均風速の鉛直方向分布係数

← 建設地周辺の地表面粗度

# 平均風速の鉛直方向分布係数

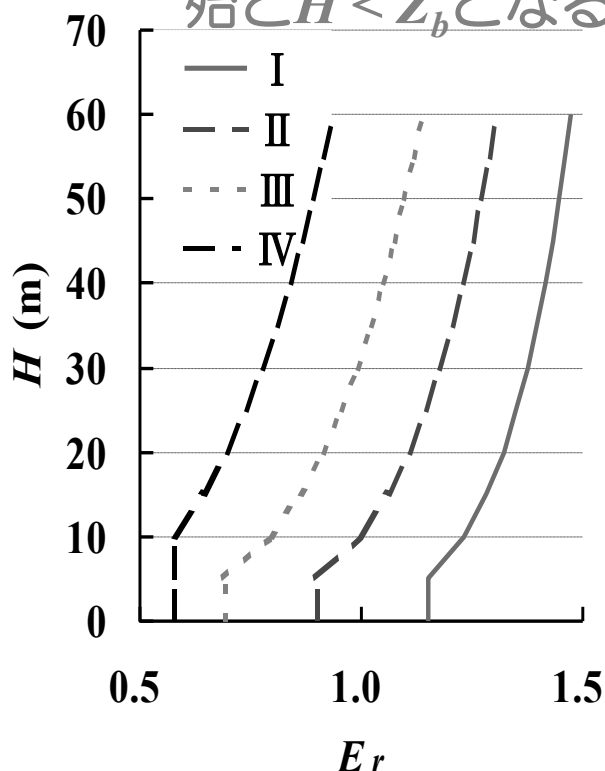
$$E_r = 1.7 \left( \frac{H}{Z_G} \right)^\alpha$$

但し,

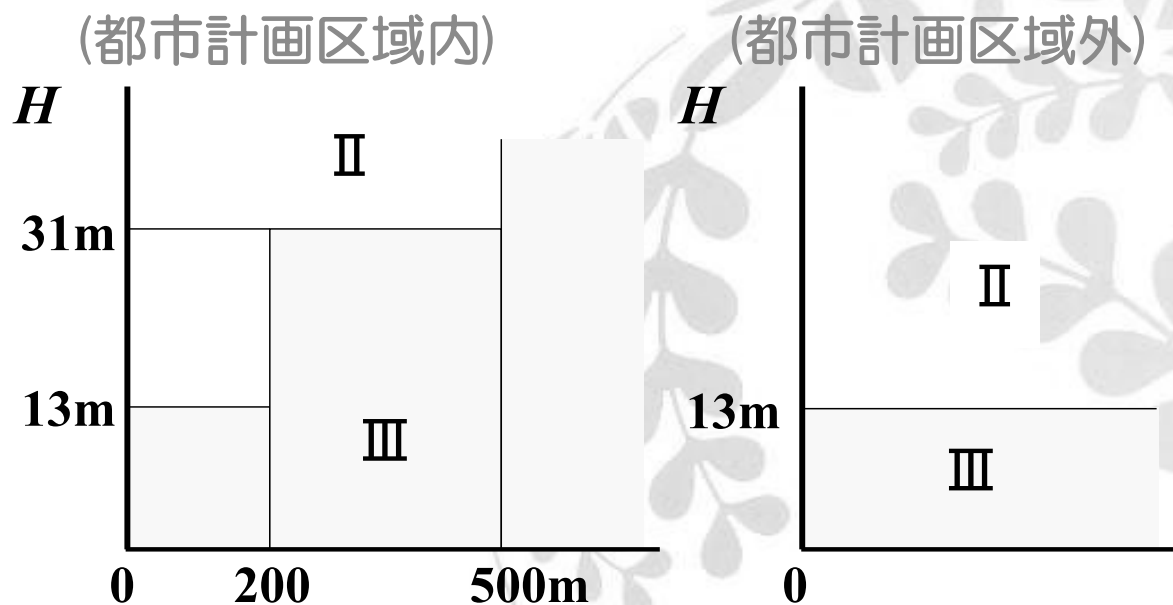
$H \leq Z_b$  のとき  $H = Z_b$

粗度区分	$Z_b$ (m)	$Z_G$ (m)	$\alpha$
I	5	250	0.10
II	5	350	0.15
III	5	450	0.20
IV	10	550	0.27

地上設置型PVでは、殆ど  $H < Z_b$  となる。



# 地表面粗度区分の設定

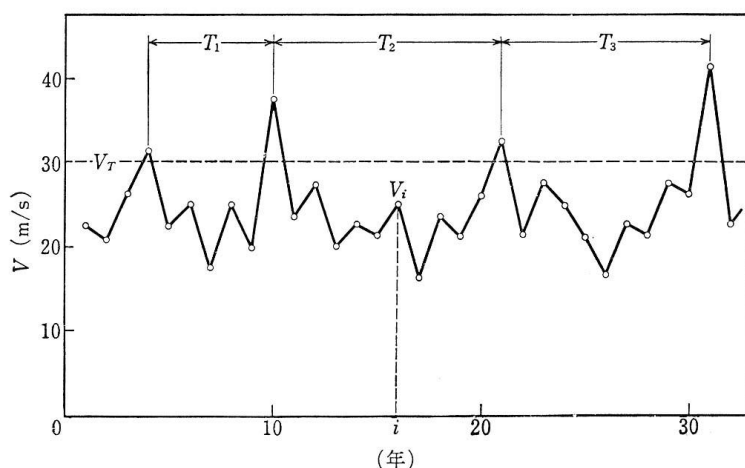


海岸線または湖岸線からの距離  
(対岸までの距離が1500m以上ある場合)

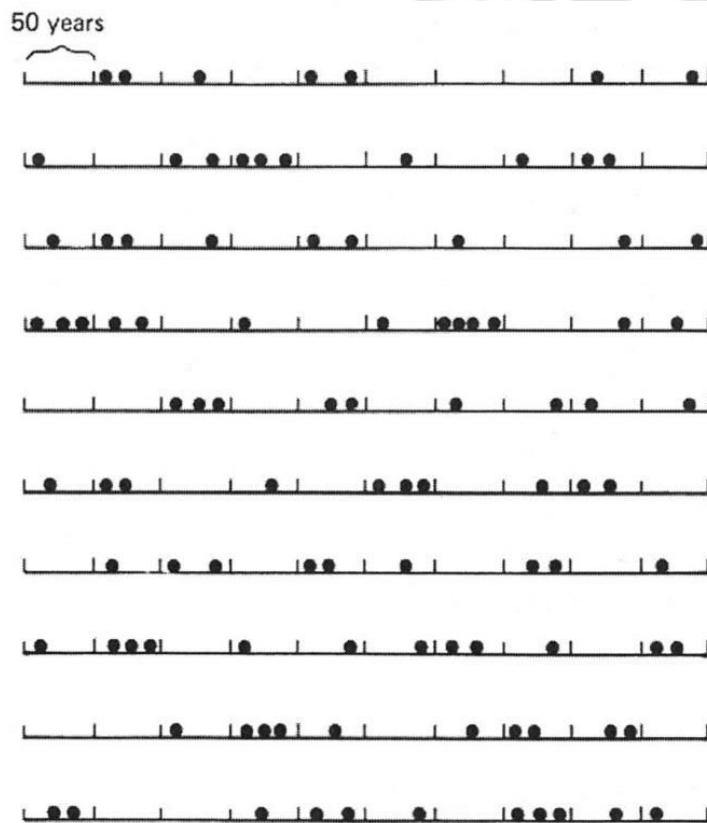
農地PVSの設計では、地表面粗度区分Ⅱ(海岸に近い場合にはⅢ)を使うべきである。

# 強風の再現期間と安全性評価

- 風速以上の強風が平均して年に1度発生(期待値)  
➡ 『 $T$ 年再現期待値  $V_T$ 』
- 年最大風速が  $V_T$  を超えてから、次に超えるまでの期間の期待値が  $T$  年  
➡ 風速の『再現期間は  $T$  年』



# 再現期間の概念



11

## 強風の再現期間と安全性評価

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

$$T = 50, N = 20 \text{ のとき } p = 0.67$$

12

# 小地形の影響



地形の影響を適切に評価

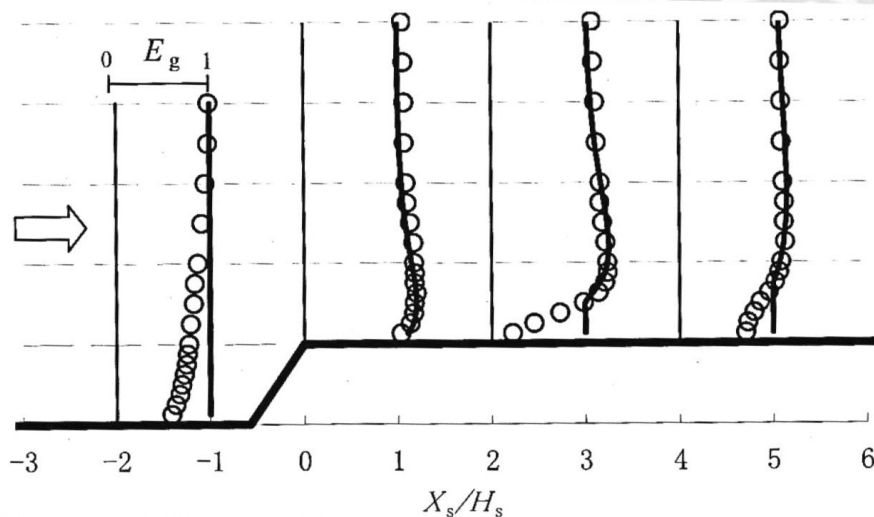


数値流体解析  
(CFD)

# 風速の鉛直分布係数(荷重指針)

$$E = E_r \cdot E_g$$

$E_g$  小地形による風速の割増係数



(二次元傾斜地形の場合)

# 数値流体解析(CFD)の利用

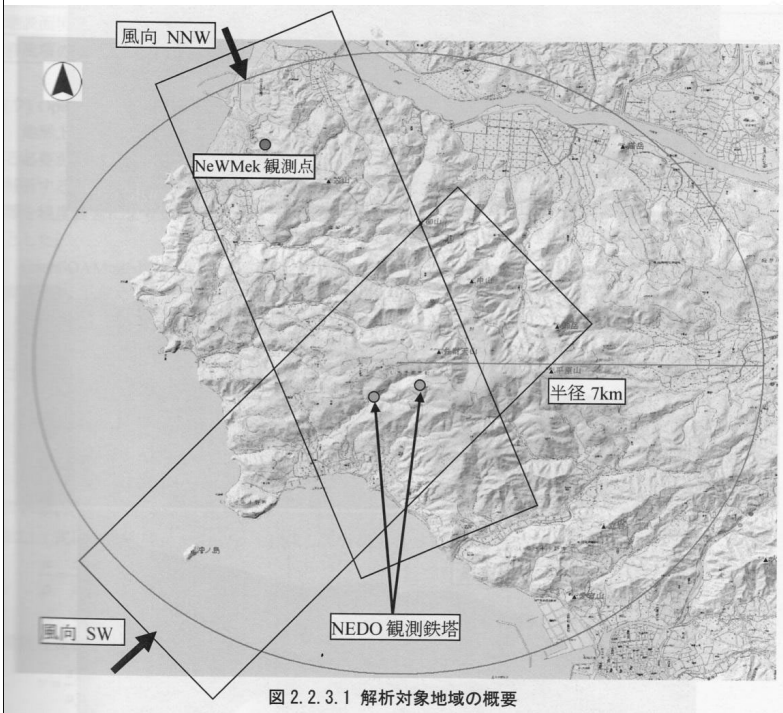
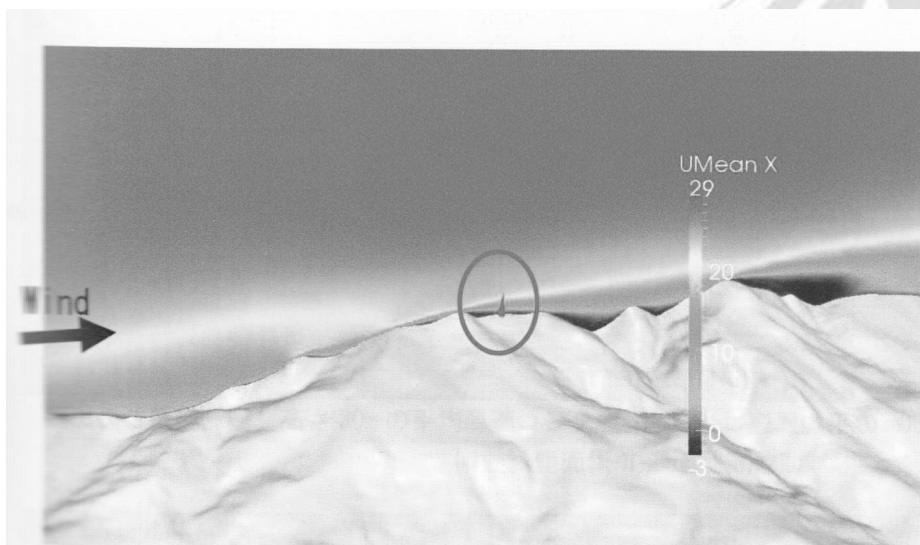


図 2.2.3.1 解析対象地域の概要

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

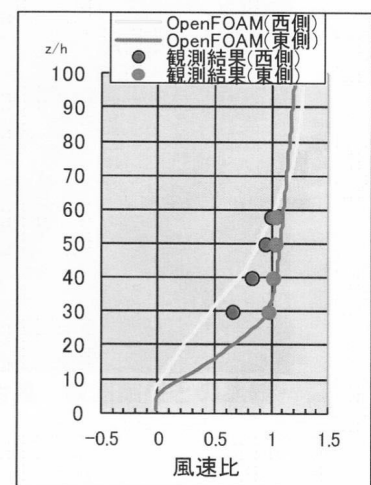
(平成24年度 建築基準整備促進事業：  
風圧力、耐風設計等の基準の合理化に資する検討 報告書)

# 数値流体解析(CFD)の利用



流下方向成分平均場 (西側観測点近傍)

(b) Case-4  $z_0$ 型粗面对数則



観測結果との比較

(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)



## 風荷重評価のポイント 2

### 風力係数・ガスト影響係数の評価

- 風洞実験
- 数値流体計算
- 実測

17

## 地上設置型太陽光発電システムの風力係数



18

## 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

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

### ■ 乱れの強さのプロファイル

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

### ■ 乱れのスケール

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

## 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. Tieleman 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

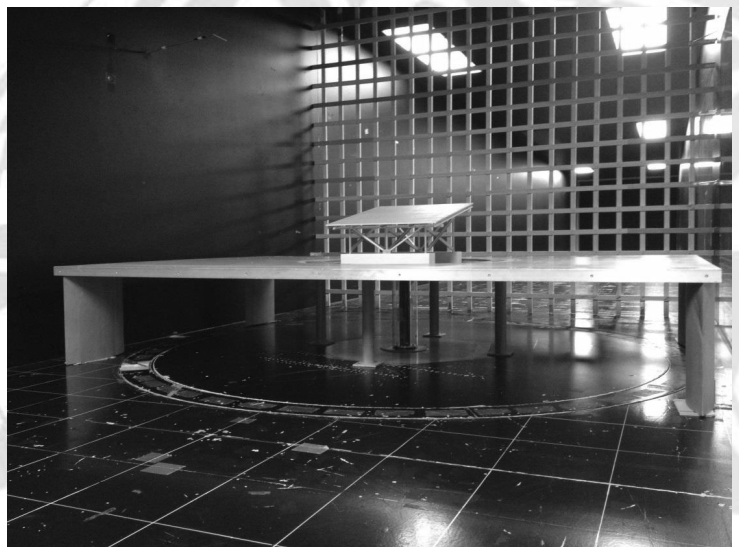
$L_B$  : 模型の代表寸法

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

Small-scale spectral density parameter

21

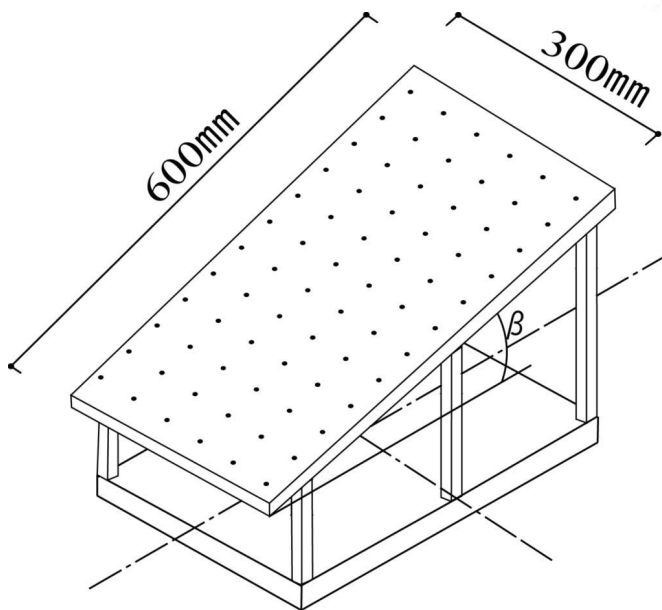
## PVに作用する風力の測定方法(1)



分力計を用いた全体力の測定

(東京工芸大学提供) 22

## 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>23</sup>

## 風力測定方法の比較

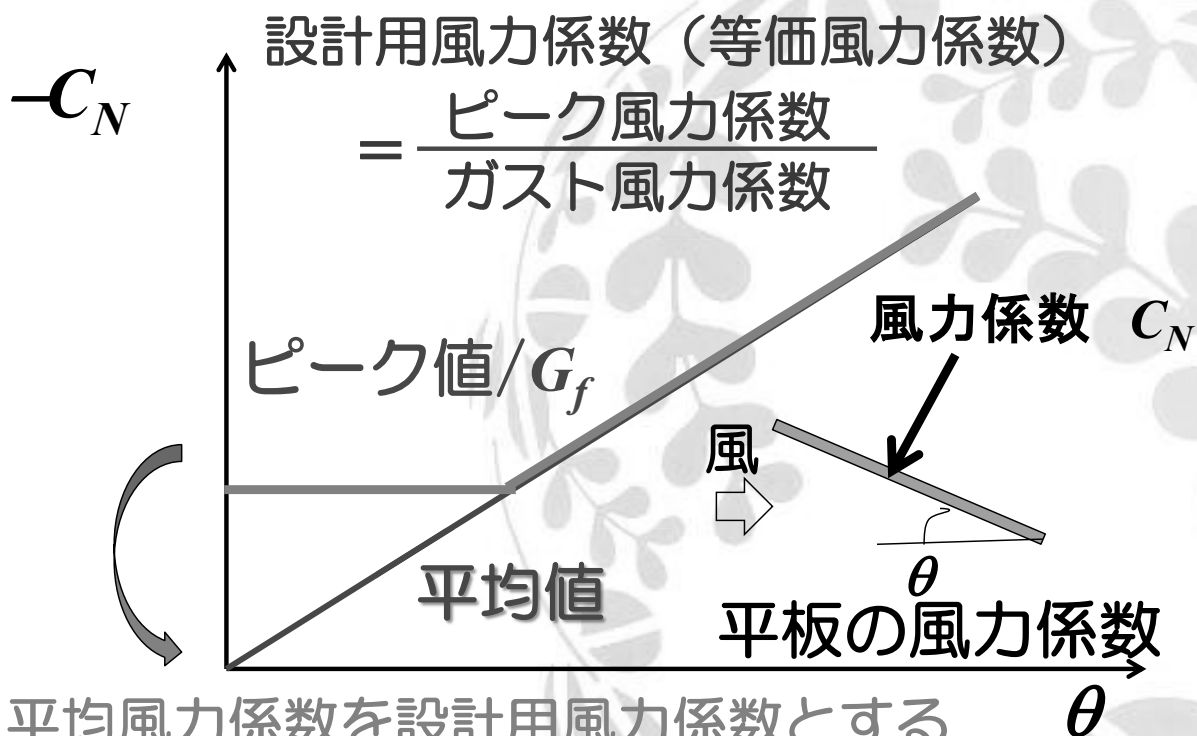
### 多点風圧測定

- ・ 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。

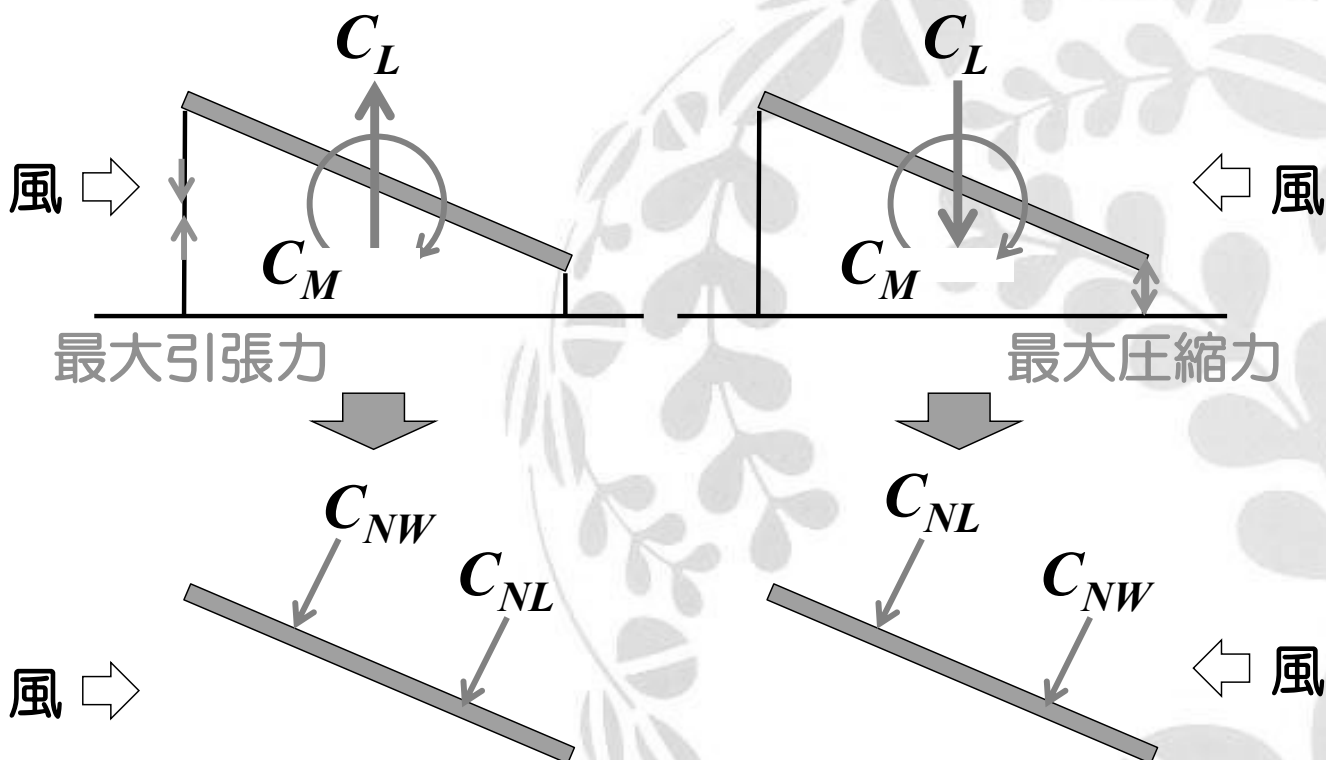
### 分力計による測定

- ・ 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。

# 適切な風力係数の評価

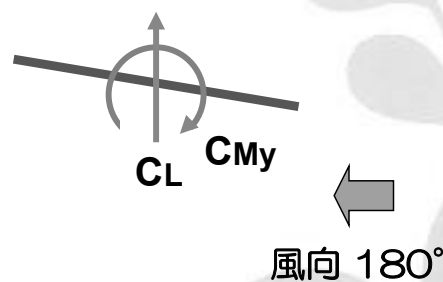
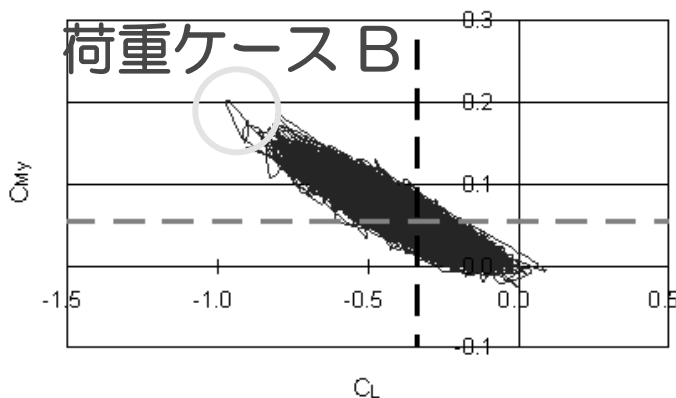
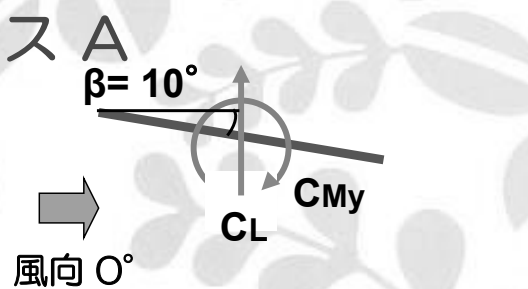
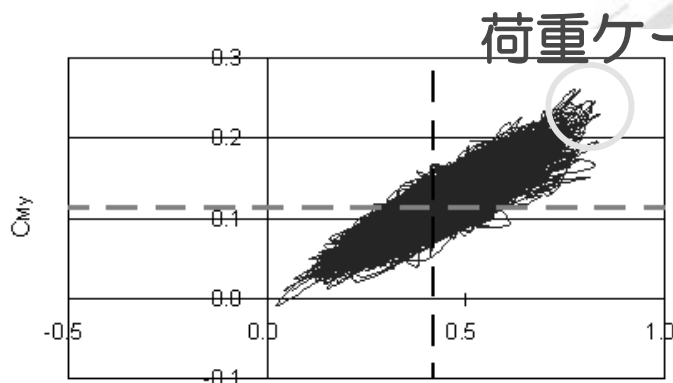


# 適切な風力係数の評価

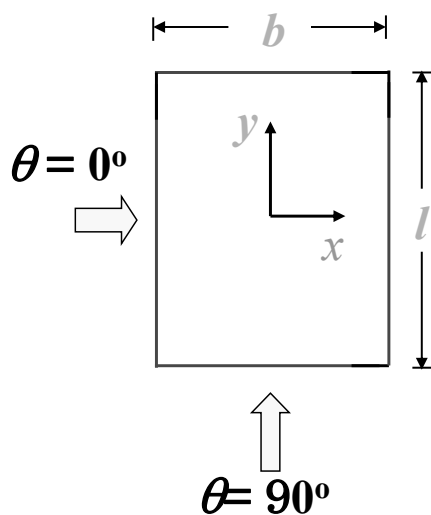
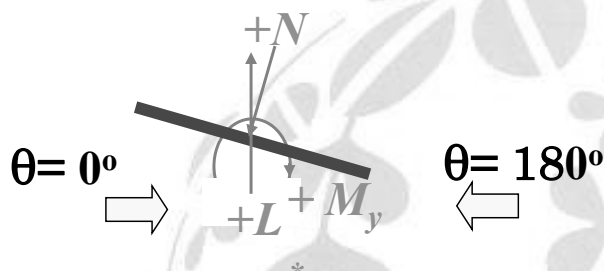


注目する荷重効果と設計用風力係数

# $C_L$ と $C_{My}$ の関係



# 風力係数・空力モーメント係数

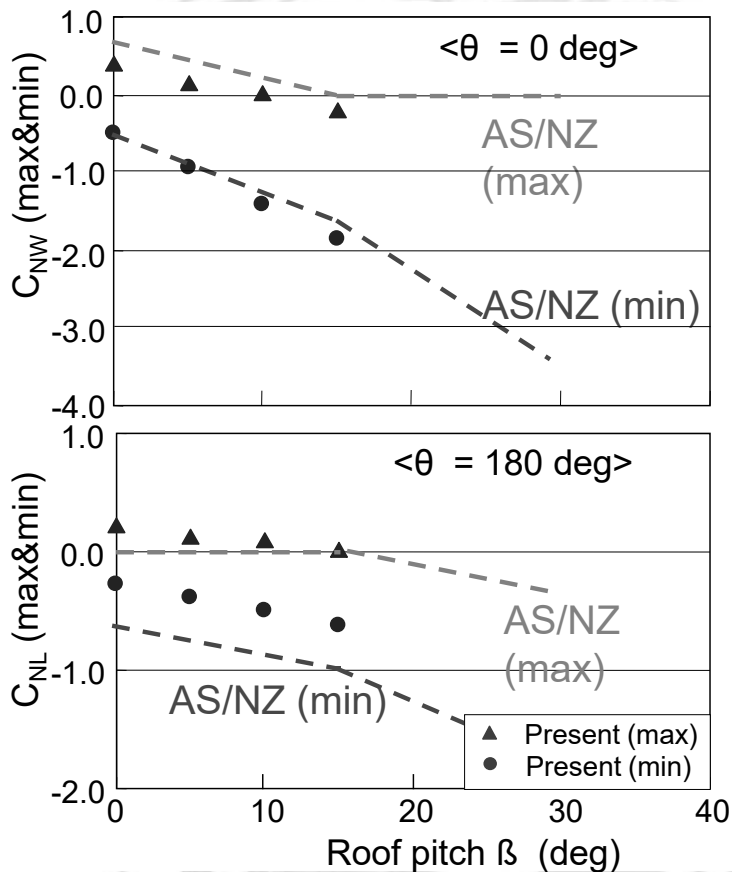
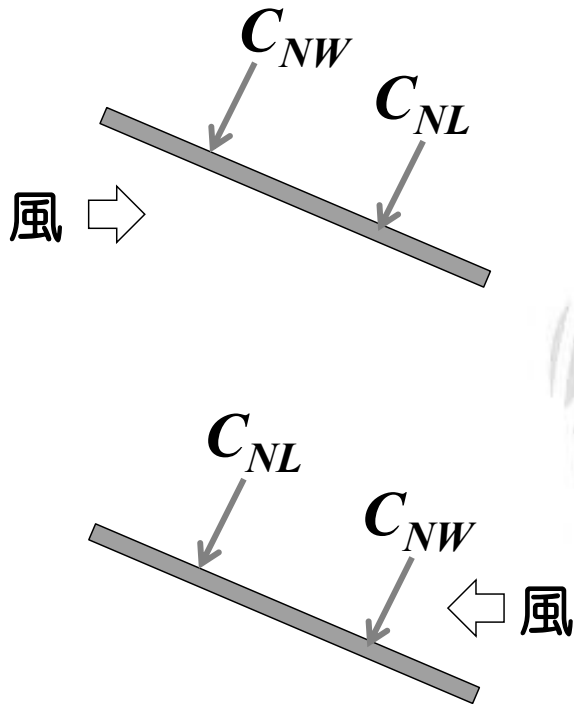


$$C_{NW} = \frac{N_W}{q_H(b^*l/2)}, \quad C_{NL} = \frac{N_L}{q_H(b^*l/2)}$$

$$C_N = \frac{N}{q_H(b^*l)}, \quad C_L = \frac{L}{q_H(bl)}$$

$$C_{Mx} = \frac{M_x}{q_H(b^2l)}, \quad C_{My} = \frac{M_y}{q_H(b^{*2}l)}$$

# 風力係数の提案



# 適切なガスト影響係数の評価

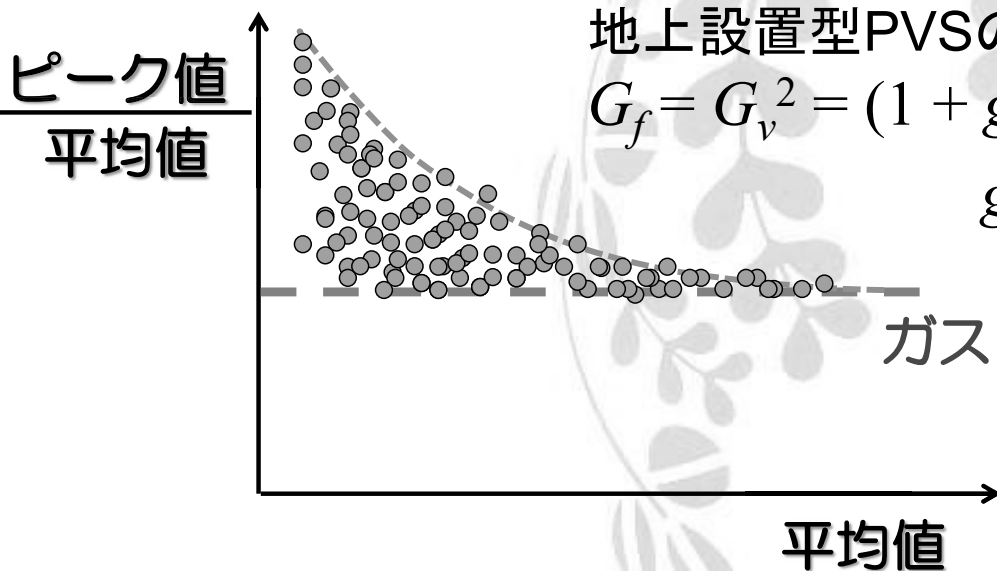
## 荷重効果に基づく評価

地上設置型PVSの場合

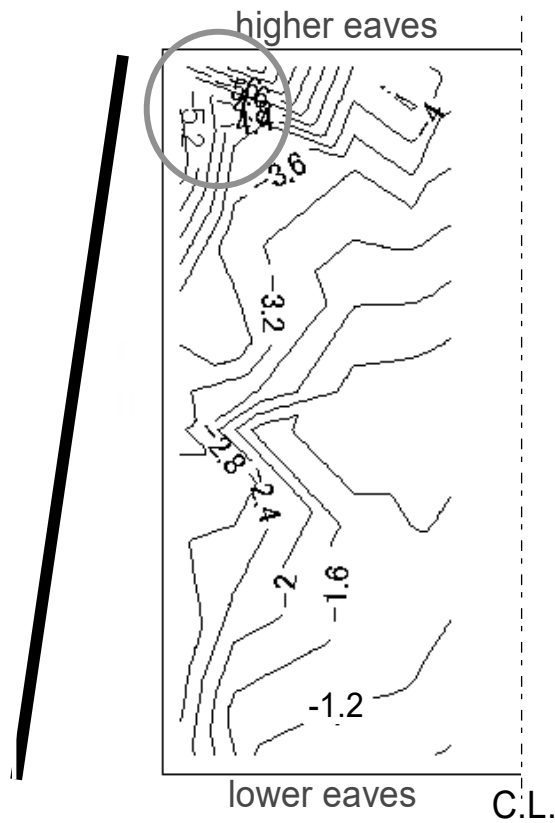
$$G_f = G_v^2 = (1 + g \cdot I_u)^2$$

$$g = 3.0$$

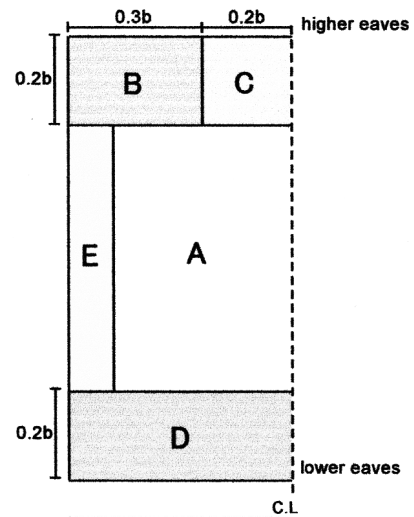
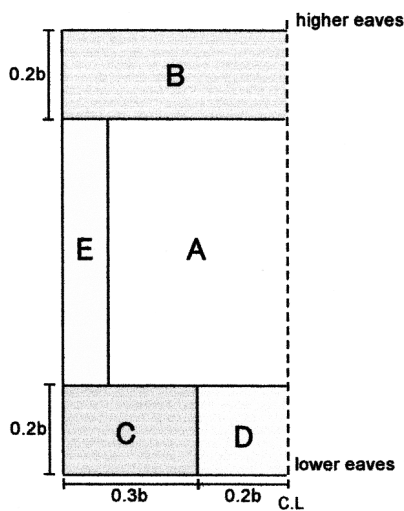
ガスト影響係数  $G_f$



# ピーク風力係数



# 外装材用ピーク風力係数の提案



zone	$\beta$ (deg)			
	0	5	10	15
A	2.0	2.1	2.2	2.5
B	2.2	2.1	2.2	2.5
C	2.2	2.2	3.5	4.2
D	2.2	2.7	3.2	3.7
E	2.2	2.7	2.5	3.3

(a) Positive wind force coefficient

zone	$\beta$ (deg)			
	0	5	10	15
A	-1.4	-2.0	-2.5	-3.2
B	-2.4	-3.6	-4.8	-6.0
C	-2.4	-3.4	-3.9	-4.2
D	-2.4	-2.4	-2.5	-2.7
E	-2.4	-3.0	-3.5	-4.3

(b) Negative wind force coefficient



# 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  
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)
  - ➡ 農地PVSでは緩和可能  
周囲に防風ネット、防風フェンスを設置

# 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、構法標準

PV、カーポート等 ➡ 経済産業省  
JIS

農地太陽光発電システム

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

# 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, PVS  
...

作用する風力には大差はない。⇒ 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)

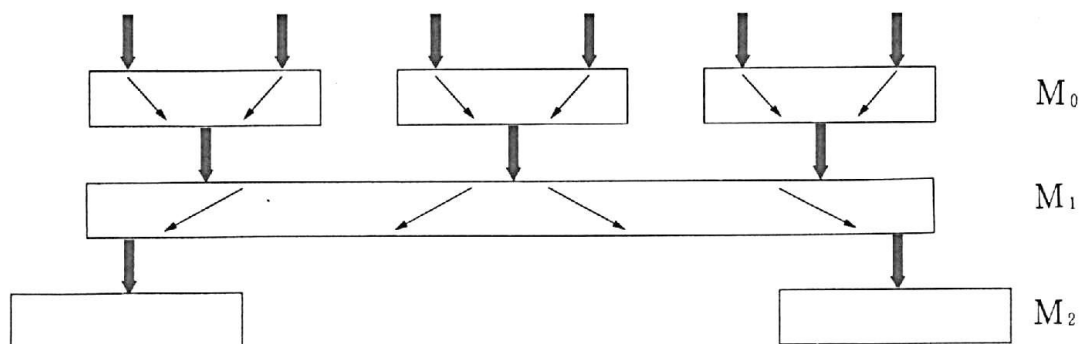
設計基準, 安全性に対する考え方の調和が必要



人間の滞留時間  
被害のインパクト(経済的, 社会的)など

35

# 外装材の構成と力の流れ



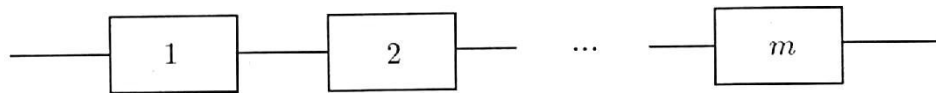
部材・接合部を流れる力 > 部材・接合部の耐力

⇒ 部材・接合部の破壊

⇒ 構造物全体の破壊

36

# 構造物の構成と破壊

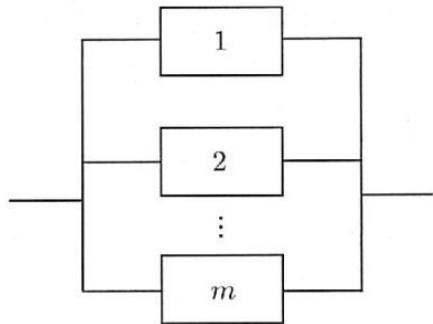


直列システム



1部材(接合部)の破壊が  
全体の破壊に繋がる

安全性を高めるには、  
冗長性を高めることが重要。

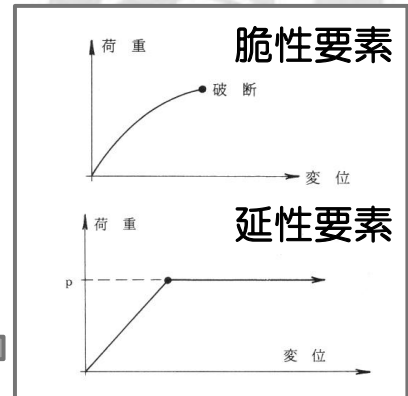


並列システム

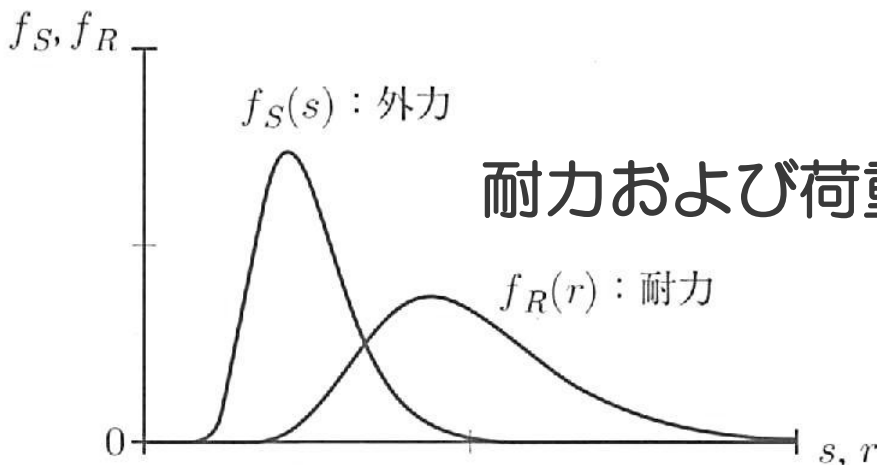


応力の再配分

全体の破壊



# 適切な耐風設計・耐風性能評価



耐力および荷重のばらつき

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

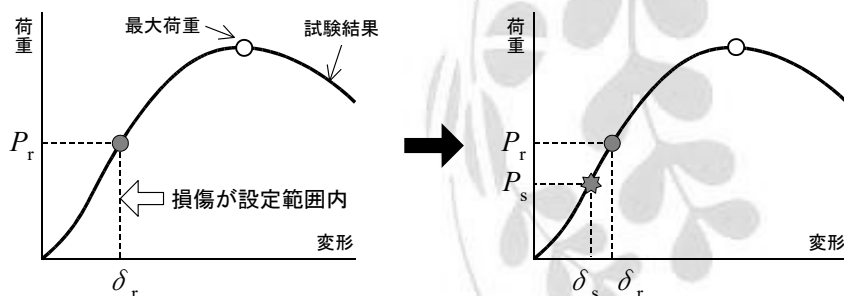
外力 $S$ および耐力 $R$ のばらつきを適切に評価  
することが重要

各種不確定性も安全率の中で評価される

# 安全率の評価

## 性能確認試験の結果の利用

想定される破壊形態の再現と耐力評価を確実に行うため、固定方法や支点間距離の実況を反映した試験体を用いることを原則とする



r: 性能確認試験で得た限界値 ( $P_r$ : 許容耐力等,  $\delta_r$ : 許容変形量)

s: 設計用荷重の載荷時に対応する応答値 ( $P_s$ : 応力値,  $\delta_s$ : 変形量)

$$\text{許容耐力} \\ \text{最大荷重} \\ = \frac{\quad}{\quad} \\ \text{安全率}$$

許容耐力の導出過程や根拠(試験体数, 最大耐力値のばらつき, 限界とする変形状態等)を明らかにしておくことが重要

39

# 空飛ぶ凶器～飛散物



0418号台風・北海道



(北海道新聞)

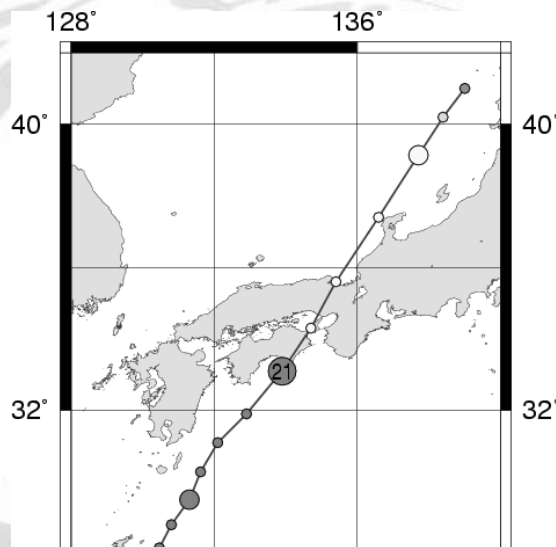
損傷しても飛散させないことが最も重要

40

# 飛散物により被害者が加害者になる



(読売新聞)



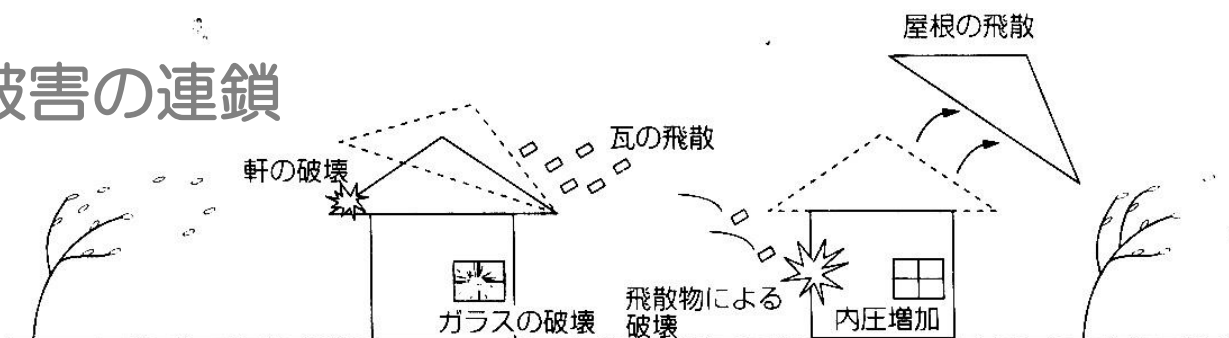
台風0406号の強風で近江八幡市のホテルの屋根(9m×41m, 総重量7t)が飛散。

新幹線架線に掛かり, 7時間にわたり不通。→ 損害賠償請求

41

# 飛散物による被害の拡大

## 被害の連鎖



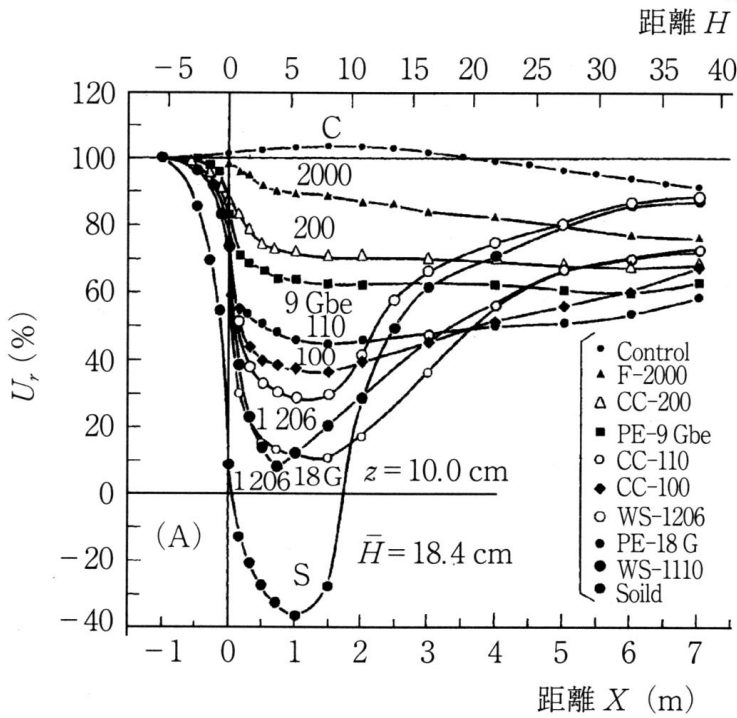
(東京工芸大学・田村幸雄教授)



(建築研究所・喜々津氏提供)

42

# フェンス・防風ネットの風速低減効果



記号	素材	充実率 (%)
Control	枠のみ	0.0
F-2000	透明寒冷紗 2000 番	18.5
CC-200	寒冷紗 200 番	32.8
PE-9Gbe	ポリエチレンラッセル	40.5
CC-110	寒冷紗 110 番	50.2
CC-100	寒冷紗 100 番	55.0
WS-1206	ポリエチレンワイドスクリーン	68.5
PE-18G	ポリエチレンラッセル	73.9
WS-1110	ポリエチレンワイドスクリーン	82.3
Solid	ベニヤ板	100.0

ご清聴ありがとうございました。