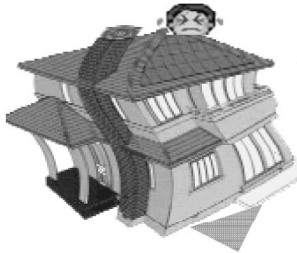


太陽光発電設備(PVS)の構造事故事例 (対策メモのみ配布)



2014/10/31 太陽エネルギー学会,
太陽光発電部会・太陽光化学バイオマス部会共催セミナー
「農村における太陽光発電システム・営農型太陽光発電・木製架台」

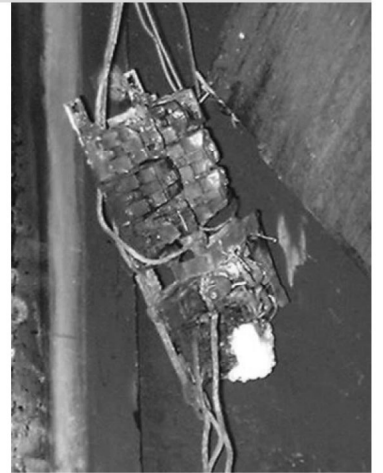
日本風工学会太陽光発電システム風荷重評価研究会委員
日本太陽エネルギー学会太陽光発電部会システムWGサブリーダー
経産省 太陽光発電システム直流電気安全委員会委員

吉富政宣

※上記は現在の公的立場。
威張ってるのではない。「情報 & 問題提起ください。適切な議題であれば
私が責任を持って委員会に反映します。このチャンネルをご利用ください」
...という意味。

材料および構造形式、火災時の崩落レベル

- ✓ 火災と消防隊員のリスク
 - ① 直流活線による感電
日射ある限り、発電は継続する。
 - ② 崩落による死傷
消火活動または残火処理時。
- ✓ 材料
 - ① 建基法では、燃焼性材料は禁止。
 - ② 一部地上設置は、電技移管(規制なし)
 - ③ 鉄材は崩落しにくい。
- ✓ 構造形式
 - ① 格子梁など不静定構造は、崩落しにくい



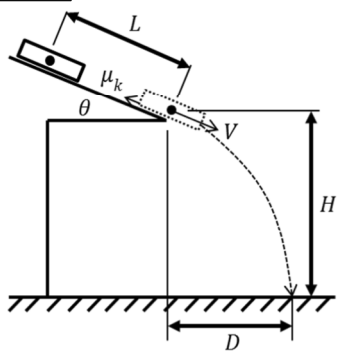
火災崩落防止の規範は、鉄材かつ不静定構造の採用にある。

落雪飛距離の計算, 雪止め耐力計画

✓ 落雪/雪止め …どちらかをはっきりさせる必要がある。

落雪

⇒ 飛距離算定



$$D = V \cos \theta \left[\sqrt{\left(\frac{V \sin \theta}{G} \right)^2 + \frac{2H}{G}} - \frac{V \sin \theta}{G} \right]$$

$$V = \sqrt{2GL(\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}$$

ここに,

V: 軒先からの飛び出し速度(cm/s)

μ_k : 雪と屋根面の動摩擦係数

θ : 勾配屋根の角度(deg.)

H: 地面からの高さ(cm)

L: 屋根雪の滑走距離(cm)

G: 重力加速度(980cm/s²)

雪止め

⇒ 耐力計画

雪止めの設置地域区分(JASS12)

■ 行政指導存在地域
■ 慣例的設置地域



(1) JASS12による評価方法

$$F = S(\sin \theta - \mu \cos \theta)$$

ここに,

F: 屋根雪の等価滑動力(N/m²)

S: 設計用屋根雪荷重

θ : 勾配屋根の角度(deg.)

μ : 屋根勾配の静摩擦係数

(2) 観測資料による評価方法

$$F = d \times \rho \times \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta)$$

ここに,

d: 勾配屋根の垂直積雪深(m)

ρ : 屋根積雪の平均密度(300kgf/m³)

θ : 勾配屋根の角度(deg.)

μ : 屋根勾配の静摩擦係数

3

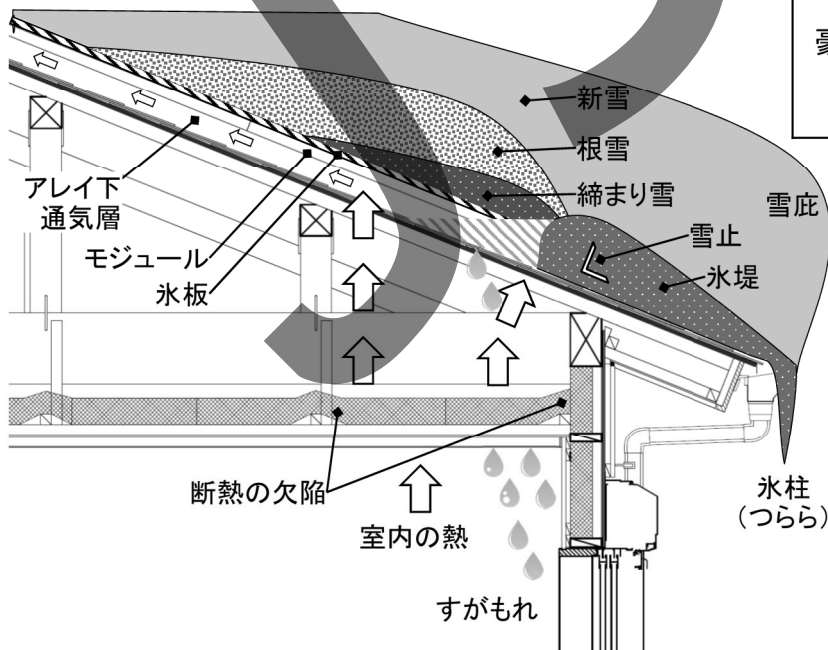
すがもれ, そして, 「雪止めのトレードオフ構造」

雪止めは, 実況に応じて設置是非が判断されるもの。

➤ もともとの問題構造

対処なし ⇒ 落雪加害

雪止め ⇒ すがもれ, 無用な建物過荷重



	雪止め無	雪止め有
一般地	× 落雪加害	○ 自然融雪
豪雪地	× 落雪加害	× すがもれ × 雪おろし滑落 × 建物圧潰 × アレイ圧潰 (アレイ地絡)

僻地あるいは, 成年から構成される家庭ならば, 自宅周辺への落雪を許容すべき。
全体の被害が少ないほうが大事。
近隣との相互理解の方が優先。
過剰な技術頼みは事故のもと。

一律な雪止め設置は, より重大な事故のもと(地域実況が優先)

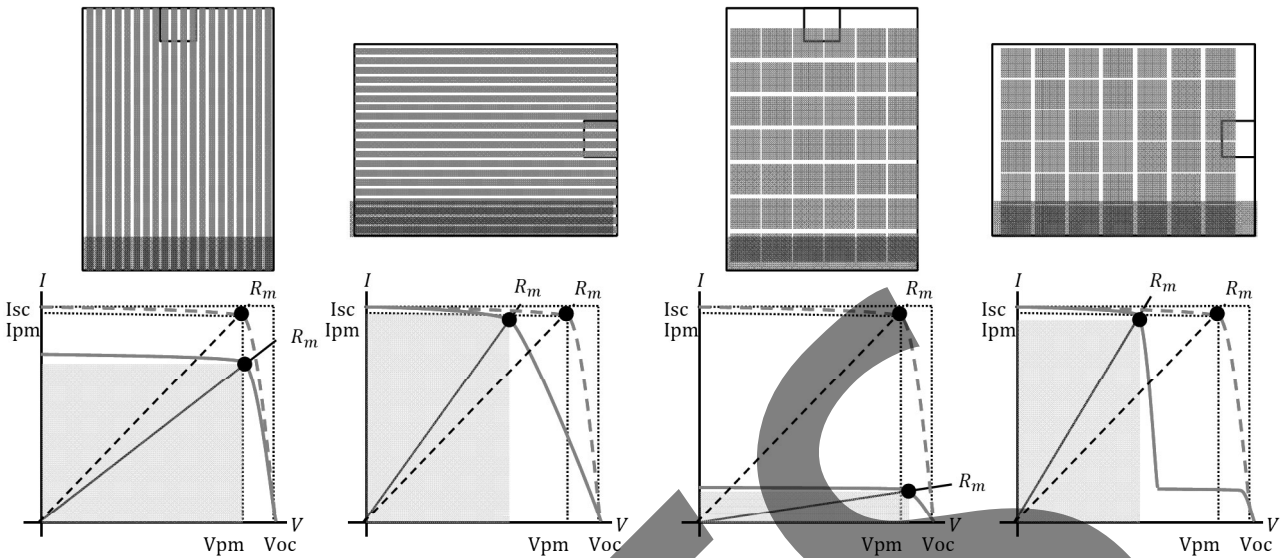
※ 誇大情報は, 豪雪経験のない人々に対し, 雪止め設置=最良と勘違いさせている。

4

選択された設置方向ごとの、発電能力および損失リスク

✓ 設置の縦横は経済性と安全性のトレードオフとなる。

➢ 結晶系にはトレードオフ傾向が強く表れるため、計画には縦横の得失への洞察が求められる。



	薄膜 縦	薄膜 横	結晶 縦	結晶 横
電气的現象	モジュール電流は、日陰率に比例して減少。	逆バイアスされたセルが、タイプB降伏し抵抗となる。	モジュール電流は、日陰セル群のRshに制限され大幅減少。	BPRに長時間大電流。日陰クラスタ電流は日陰セル群のIphとその合成Rshによって制限される。
火災安全性	-	-	-	× BPRが疲労破壊しやすい。
構造安全性	-	× sin荷重に脆弱	-	× sin荷重に脆弱
発電性能	○ 発電量最大	-	× 発電最小	○ 発電最大

5

雪氷荷重 失敗要素のまとめ@Mdl.

✓ 法の未整備

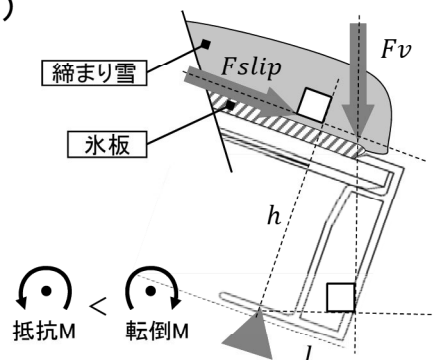
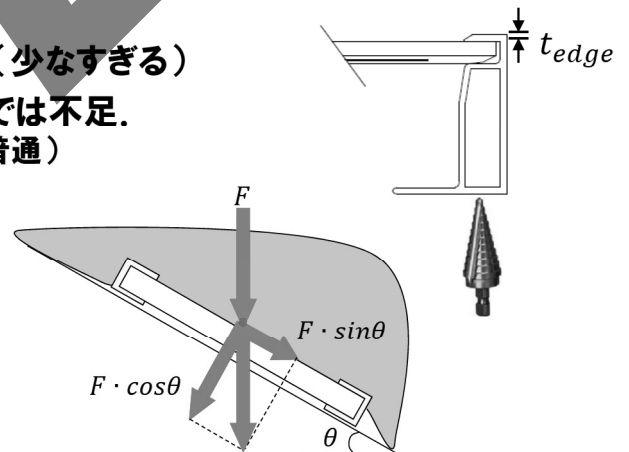
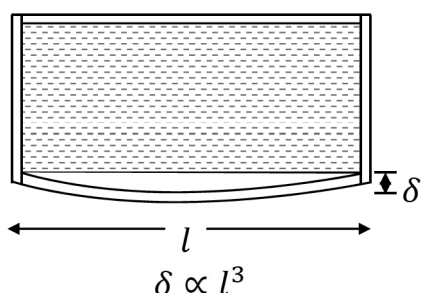
- ① 1455号, JISC8955の荷重“効果”は非現実(少なすぎる)
- ② 内陸においてはIEC61215の2400/5400Paでは不足。
(シリコンフレーミング0.5m品を特注するのが普通)

✓ 荷重増加機構関連

- ① フレームのエッジへの滑雪荷重(Sinθ荷重)
- ② 水抜き穴不在によるフレーム凍結膨張。

✓ 荷重支承機構関連

- ① タワミδの関数である, 下端フレームの長さ, およびフレームの断面二次モーメント(Ix, Iy).
(IECは面荷重しか評価しない. 水下方向荷重が重要)
- ② フレームの転倒モーメント



6

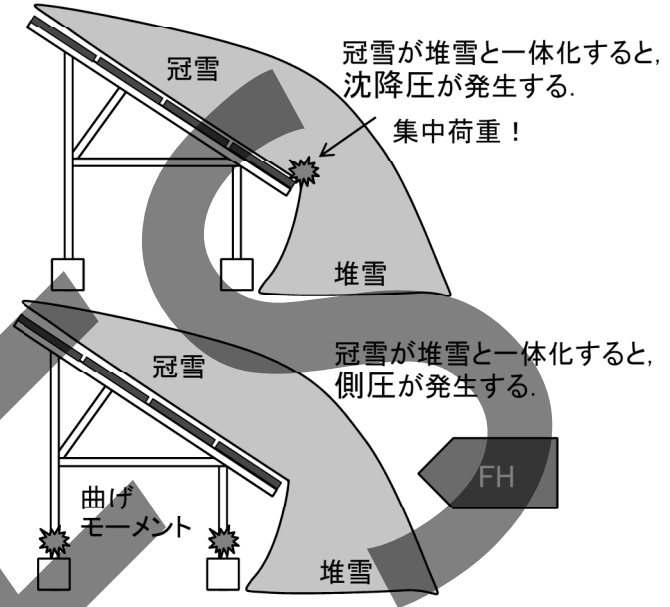
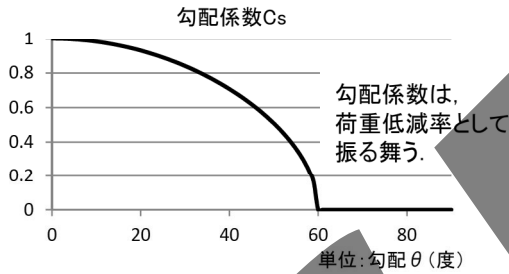
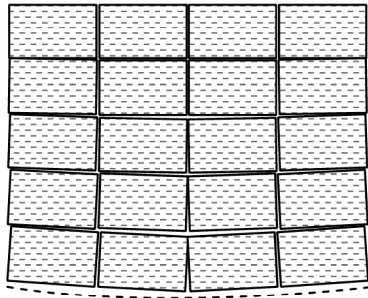
雪氷荷重 失敗要素のまとめ@架台

✓ 荷重増加機構

- ① 多重梁効果による, 下端梁へのMdl. 自重重畳.
- ② 沈降圧
- ③ 水平方向荷重FH, 横捻じれ座屈
- ④ 屋根形状係数 $C_s = \sqrt{\cos(1.5\beta)}$ による荷重割引の非現実性

(2007年版建築物の構造物関係技術基準解説書【国交省】によると、「非凍着」と「小屋裏暖房」が適用条件)

昭和19年の戦時物資節約目的の下文に由来.
臨時日本基準規格第532号(下線筆者)
第1条 本規格は, 戦時下建築せらるる一般建築物
の強度計算につき, 主要資材の節約を得る目的を
持って採用すべき荷重を制定したるものとす.



7

雪氷荷重 失敗要素のまとめ@架台

無設計(サボリ)が最も重大な問題。

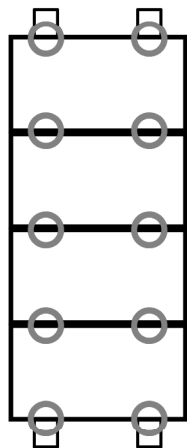
次に無知(これは外部からケア可能),

最後に法規未整備の問題がある。

これらの問題は, 次に述べる風荷重で一層深刻

BT冗長性の検討(固定点数と事故確率の試算例)

損傷確率63%



(250W/Module)×4,000枚=1MW
(4Module/Panel)=1kW
(10BT/Panel)×1,000panel=1MW
10BT×1000Panel=10,000本

このシステムでは僅か1本の誤りが
モジュールに過大な折り曲げ荷重を
与え、事故となる。

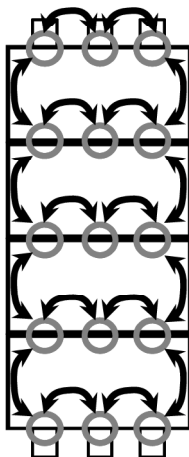
10,000本のうち9,999本を誤らず
施工する精鋭チームでも、完全なシ
ステムは37%しか出来ない。

$$R_1 = r^n = 0.9999^{10,000} = 0.37$$

つまり、失敗を含むシステムは63%
に上る。

$$F_1 = 1 - R_1 = 1 - 0.37 = 0.63$$

損傷確率0.02%



梁3本で検討。ボルト数は全部で15,000本。
15,000本のうち99.99%を誤らず施工する精鋭チ
ームでも、完全なシステムは22%しか出来ない。

$$R_1 = r^n = 0.9999^{15,000} = 0.223$$

だがこのパネル化時の1本の誤りは事故にならない。

$$F_0 = 15C0 \times 0.0001^0 \times 0.9999^{15} = 0.9985010495$$

$$F_1 = 15C1 \times 0.0001^1 \times 0.9999^{14} = 0.00149790136$$

$$F_2 = 15C2 \times 0.0001^2 \times 0.9999^{13} = 0.00000104863$$

また、2本誤る確率 F_2 のうち、非隣接ボルト同士や中
央列の誤りは、事故を導かない。(矢印の18通りのみ
を検討)

$$separate_{F_2} = \frac{15C2 - 18}{15C2} = \frac{87}{105} = 0.8285714286$$

パネルの信頼度は、許容可能な誤りの和となる。

$$R_{panel} = F_0 + F_1 + F_2 \times separate_{F_2} = 0.9999998197$$

システムにパネルは1000枚。システム信頼度は、

$$R_{system} = R_{panel}^{1000} = 0.9998197411 \approx 99.98\%$$

出典:吉富, 太陽エネルギー
検算協力: JX石井@Maxima

太陽電池と架台との締結が、単独固定部と兼用固定部から構成されるケースを例にとる。
モジュールはリジッドではない。また、これは完全直列システムである。

直列型システムでは、ボルトのいずれかひとつが正しく施工されないだけで崩壊を招く。

一般に、「ボルト固定不良による事故は施工ミス」と断定される。しかしその前に、

- ボルト施工信頼度100%とする前提の異常性(施工バラつきは存在しないとの大胆な仮定)を知り、
- 太陽電池と架台との締結に冗長性を付与する必要がある。

(ボルト6点止め、あるいは長尺プレート固定方式であれば事故確率は大幅低下する)

作業者に帰責しつつける限り、事故は絶対に減少しない。

9

システムの「要素要求」「順序要求」「構造最優先原則」

✓ 4要素要求

構造設計, 電気設計, 施工, 保全

✓ 順序要求

構造設計→電気設計→施工→保全

…システムとはひとつの建築物。

建築作業において、

屋根葺きのあとに基礎を打つことは出来ない。

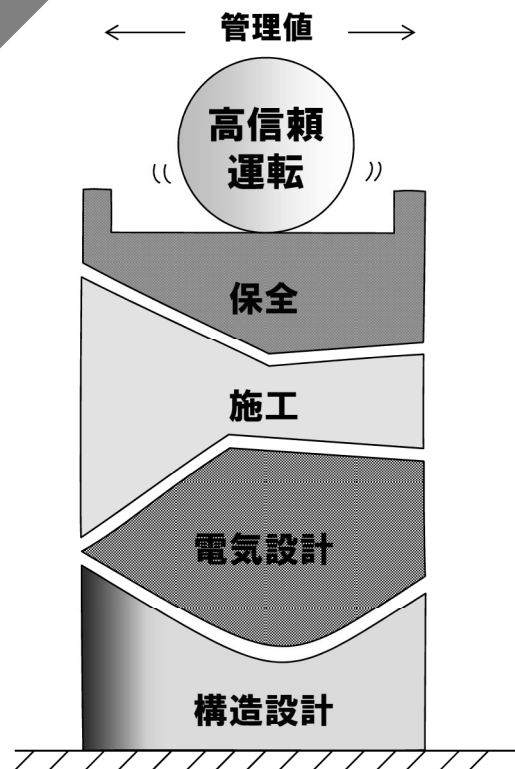
PVSも建築物と同様、

ただひとつの順序でしか、成立しえない。

✓ 構造最優先の原則。

電気がダメなとき、構造を巻き込むことは(滅多に)ない。

しかし、構造がダメだと、全てを巻き込む。

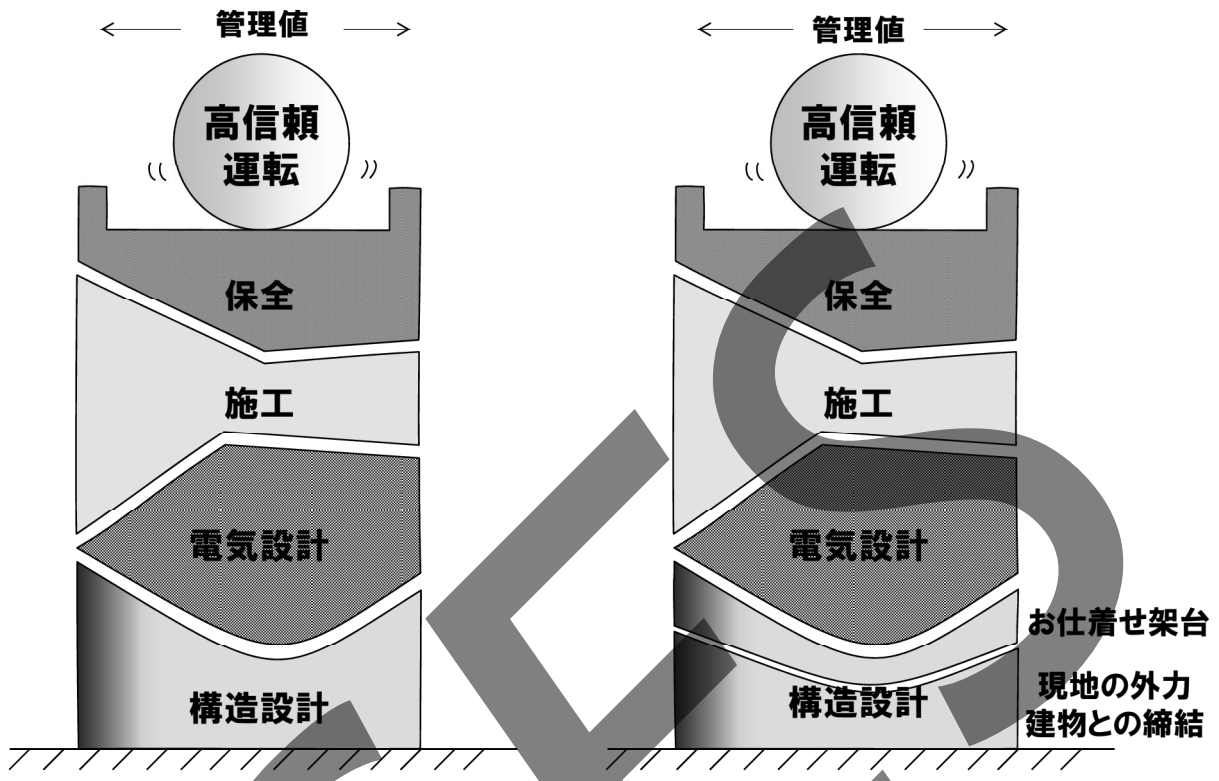


よくある勘違い

「市販品は、構造設計済みでは？」

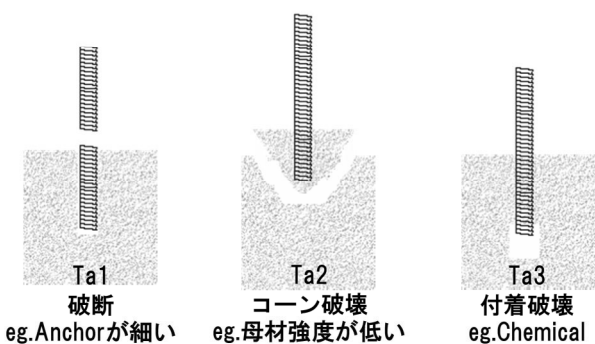
「材料構造設計」と「工事中用構造設計」

- 架台製造業者が設計している(だから大丈夫)という見方は間違い。
 - ✓ 架台材料の強度と、建物との締結関係は無相関。
 - ✓ 支給された材料と建物をつなぐのは、設置業者の仕事。



11

抵抗モーメント不足



- 背景
設置業者はALC母材のコーン破壊(Ta2型)を恐れ、重量基礎工法を採択。基礎の重量は不足していた。
- 現象
突風時、転倒モーメント超過。アレイは落下
- 考察
解釈46条は架台強度検証を規定。しかし本件では架台～建物の締結部の検討が省略されている。(架台材料強度は十分。だが意味無し)

出典:匿名(非公開), 請負者から聴取 12

法規規はこうなっているか

✓ 電気設備技術基準の目的(章だて)

➤ 第一章 総則

第一節 総則

第一条 用語の定義, 第二条 電圧の種別

第二節 適用除外

第三条 適用除外

第三節 保安原則

第一款 感電, 火災等の防止 以下略

第四節 公害等の防止 以下略

➤ 第二章 電気の供給のための電気設備の施設

第一節 感電, 火災等の防止 以下略

➤ 第三章 電気使用場所の施設

第一節 感電, 火災等の防止 以下略

常に上位に据えられているのは,

1. 感電防止
2. 火災防止
3. 公害防止

すなわち, 憲法の「公共の福祉」にトレサブル。
しかもこれらは, 社会規範として当たり前のこと。

次に, 構造細則のトレーサビリティを確認する。

13

構造細則のトレーサビリティ

- 2011年, 国土交通省は, 太陽光発電の二重規制に対応するため, 規制緩和を打ち出した。
 - 「電気事業法において安全性が担保されることを前提に, 建築基準法を改正し, 準用対象としないこととする」
 - 太陽光発電の構造規定は形式上, 次の格好になった。

建築基準法 & 電気事業法の二重規制	→ 電気事業法へ一本化
国土交通省と経済産業省の二監督体制	→ 経済産業省へ一本化

- 太陽光発電の構造規定は現在, 以下の経路によって法令から呼び出されている。

電気事業法(法39条第一項および第56条第一項の規定から電技を呼び出し)

電気設備技術基準(経済産業省令)

行政手続法(H5年)

行政による法運用の密室性・恣意可能性に外圧, 法解釈の公開が行われることとなった

電気設備技術基準解釈46条(原子力安全保安院が策定)

JISC8955 太陽光発電用支持物設計標準(旧通産省研究成果を規格化)

規制緩和前は, 建築基準法と解釈(JIS)の二重規制であった。

現在は, 解釈(JIS)の構造規定が主な基準となっている。

ただし解釈(JIS)は, 外力, 特に風荷重と積雪荷重(雪氷荷重)のほとんどをカバーできていない。

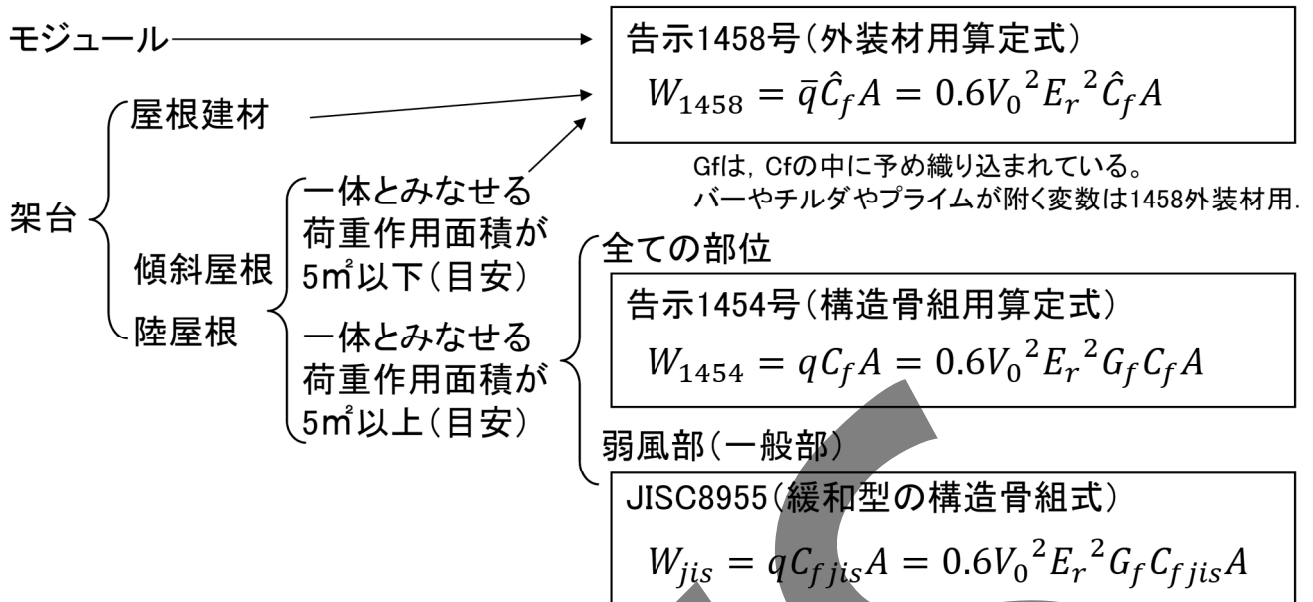
※国住指1152による, 国交省からの法的制御があるにはあるが, 事実上ノーコン。

建基法適用除外案件(メガソーラー等に多い)は, 電事法に所属。

これらについては, 電気専門家が構造部もケアする義務がある。

14

モデリングと風荷重の導出(現在の計算法は3ルート)



外力計算結果が大きい順に並べると以下

外装材計算 > 構造骨組計算 > JIS緩和計算

- ・モジュールは、1458号で解く(ただし風力係数は実験値)。
- ・外装材型架台は、1458号で解く(ただし風力係数は実験値)。
- ・構造骨組型架台は、1454号で解く(稀にJISC8955採用可能)

※ややこしく思えるがこれは日本法だけではない。英米豪はもっとややこしい。
※法律が悪いのではなく、風性状の現実の方がややこしいと考えるべきである。

15

地表面粗度IIIの固定化

地表面が平滑なほど風圧力が強くなることは、殆ど理解されていない。



(a) Terrain category I



(b) Terrain category II



(c) Terrain category III

I 地域の比例係数

$$\left(1.7 \times \left(\frac{5}{250} \right)^{0.1} \right)^2 = 1.32$$

両者の比は、 $1.32 \div 0.48 = 2.77$

III地域の比例係数

$$\left(1.7 \times \left(\frac{5}{450} \right)^{0.2} \right)^2 = 0.48$$

写真は、建築物荷重指針 6.1一般 6.1.1適用範囲 P.325

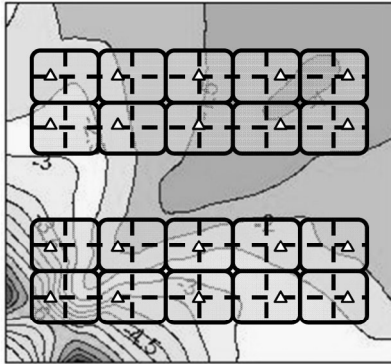
現実のメガソーラーの立地は、IまたはIIの地表面粗度。

IIIで評価された材料がIやIIに用いられている現状がある。
背景: IV評価を推進する勢力, IIIが大半を占めていた住宅市場

構造骨組型から外装材型への変遷(陸屋根架台を例に)

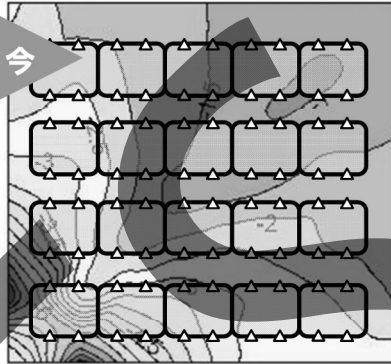
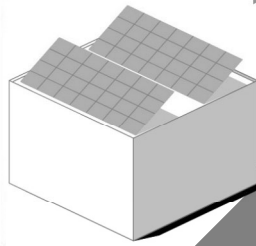
モジュールがアレイ化され、アレイ基礎梁が建物主要構造部または屋根スラブに固定される。

モジュール単体が金具4点にて屋根材に固定される。

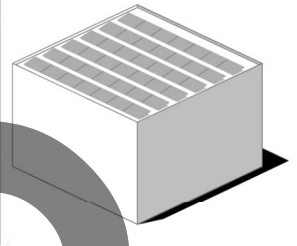


構造骨組モデル
(1454号, JIS)

昔



外装材モデル
(1458号)

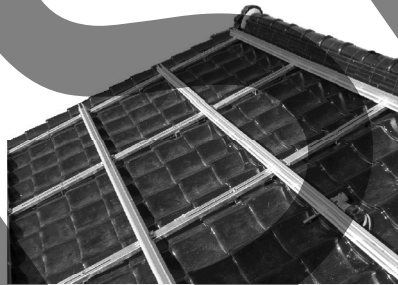
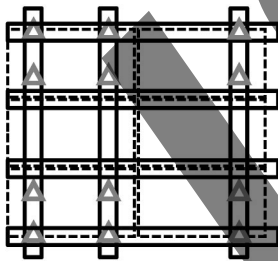


モーメント分配あり(面積効果, 規模効果と言う)
∴要割引荷重評価

モーメント分配なし
∴要実荷重評価

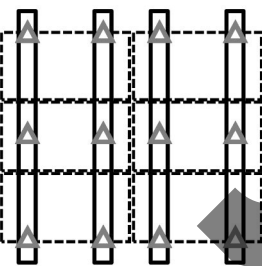
主流架台は、構造骨組モデルから外装材モデルへと変遷。にも関わらず、外装材型の架台を、構造骨組として誤計算するPVメーカー・業者が大多数。

外装材/構造骨組の分別イメージ(傾斜屋根架台を例に)



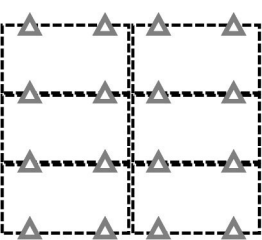
格子型

- ✓ 面積効果あり(構造骨組)
不静定次数大, 部材消失感度低
構造安全性高
- ✓ 等電位ボンディングあり.
電気安全性高



縦梁型

- ✓ 面積効果寡少(外装材)
部材消失感度高
構造危険度中
- ✓ 等電位ボンディングなし.
電気危険度“大”

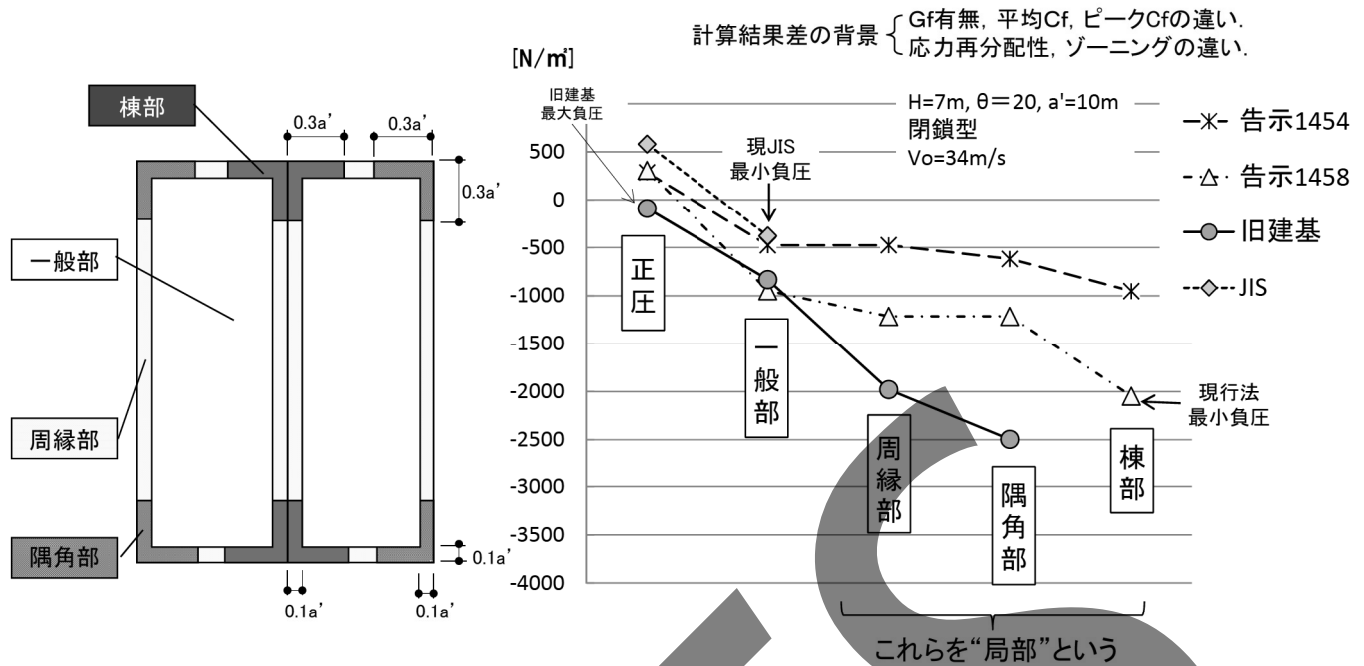


直接固定型

- ✓ 面積効果なし(外装材)
部材消失感度高
構造危険度大
- ✓ 等電位ボンディングなし.
電気危険度“大”

縦梁型・直接固定型に現行JIS(2011)を用いると、0.1~0.5の強度。但し格子型は現行JISでもOK。

モデルの違いによる風圧力計算結果の違い(傾斜屋根例)



※大きさのイメージを正しく持つため、1458ゾーニング横軸に据えて「質の異なるもの同士を比較」した。
 ※1458号において局部に関する名称には複数系列あるが、どれも同じものを指している。
 {周縁部, 隅角部, 棟部} はそれぞれ{局部, 準局部, 超局部}の名称に完全一対一対応する。

JISC8955(簡易計算)
 1454(構造骨組計算)
 1458(外装材計算)

構造骨組へ一般部設置のみ評価(建基法ゾーニングとは異なる)
 格子型架台など、応力の再分配を生じる架台の評価に用いる。
 モジュール単体、梁の連続性が少ない昨今の架台の評価に用いる。

19

風荷重 失敗要素のまとめ@Mdl.およびパネル

✓ 荷重見積もりの間違い

- ① JIS採用は明らかな誤り。この場合、荷重を数分の一に過小見積もることになる。正しくは、風洞実験または、1458号の風工学モデル(外装材)を用いる。
- ② IEC61215の2400Paで済むのは都市部の四号建築+地上メガくらい。5400Paは負圧耐性なし。
- ③ 法(建基令, 告示, 建基施工規則)は、IEC61215ではなく、限界耐力設計法の限界耐力や終局耐力(破壊荷重@実験)を要求(ただし非明示)。
 ※ガラス割れを許容したとしても、ガラス脱落を許容してはならない。

風荷重 失敗要素のまとめ@架台

✓ ルールの未整備, 荷重見積もりの間違い, 構造設計の省略

- ① 現行架台へのJIS適用は誤り。(日本風工学会・建築学会・筆者らの風洞実験結果に対し、過小) 正しくは、風洞実験または、1458号の風工学モデル(外装材)を用いる。ただし、90'sに主流であった格子型架台には、JIS適用可能性あり。
- ② よくある間違いは、
 - ・地表面粗度ⅠやⅡをⅢと見做すケース(約1/3の過小見積もりとなる)
 - ・荷重伝達経路(ロードパス)未完成(荷重を大地にまで伝達する必要がある)
 - ・施工漏れ確率の未検討(ミスをなくすのは不可能, 冗長性によって配慮すべき)
 - ・(販売・施工会社の)転倒モーメント検討漏れ
- ③ 最も深刻なのは、構造設計省略@住宅・メガソーラ・農地PV。

昨今の架台に対し従来JISを適用すると強度不足。新JISは外装材対応予定

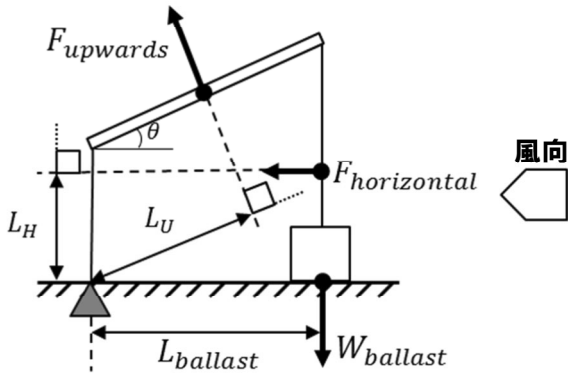
20

風荷重 失敗への基本的対策@架台(工用構造計算)

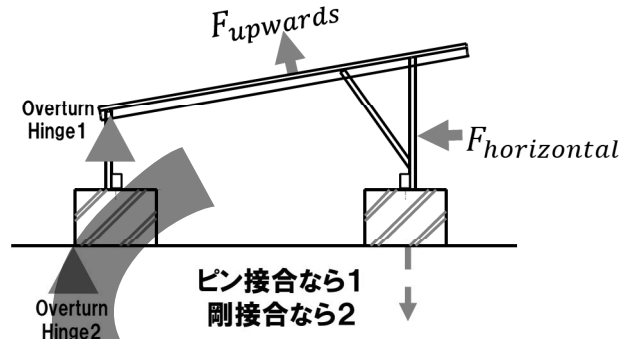
✓ 抵抗モーメント>転倒モーメント とする。算定方法は以下。

- $M_w = F_{upwards} \cdot L_U + F_{horizontal} \cdot L_H$
- $M_r = \Sigma(W_{ballast} \cdot L_{ballast}) + \Sigma(W_{self} \cdot L_{self})$

左記計算は、以下準備の後。
風荷重算定、仮断面設計、 σ τ δ 計算、
重心(図心)、母材圧縮強度測定。

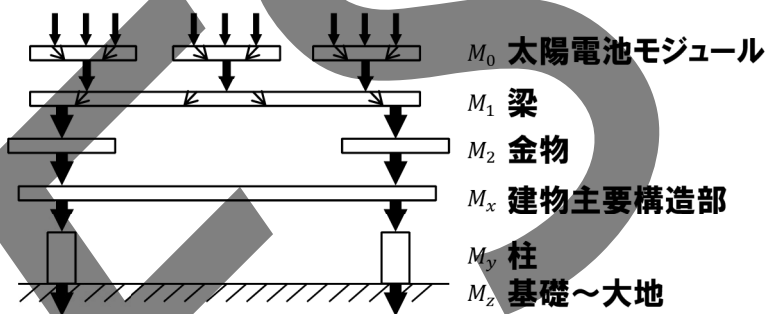


転倒ヒンジの選び方



✓ ロードパスを完成させる。
一つでも検討漏れがあると、
加害型の波及事故となる。

✓ 変数の感度解析をする(次頁)。



☆☆☆ 参考:各変数の感度(影響度) ☆☆☆

✓ 風圧力(影響度の高い変数, その定義域)

- V_0 沖縄² = 46² = 2116, V_0 西東京² = 30² = 900,
- $E_{rI@10m}$ ² = 1,519, $E_{rIII@10m}$ ² = 0.631,
- $C_{f_clad_open} = -6.9$, $C_{f_frame_flat} \cdot G_f@III = -0.9 \cdot 2.5 = -2.25$,

↑ 幅は2.35倍, 知られている。
17倍 幅は2.41倍, 知られていない。
幅は3.07倍, 知られていない。

- ↑ 17倍 値域1 沖縄, I地域, 屋根建材型(開放型建築), モジュールについて
 $W_{1458I@10m} = 0.6V_0^2 E_r^2 \hat{C}_f A = q \hat{C}_f A = 1929 \times (-6.9) = -13.3kN/m^2 (1m^2のとき)$
- ↑ 17倍 値域2 西東京 III地域, 屋根への平板設置, 架台について
 $W_{1454III@10m} = 0.6V_0^2 E_r^2 G_f C_f A = q C_f A = 852 \times (-0.9) = -0.77kN/m^2 (1m^2のとき)$

✓ 内力の安全率

- せん断力, 曲げモーメント, タワミ...と, 転倒モーメント(反力)

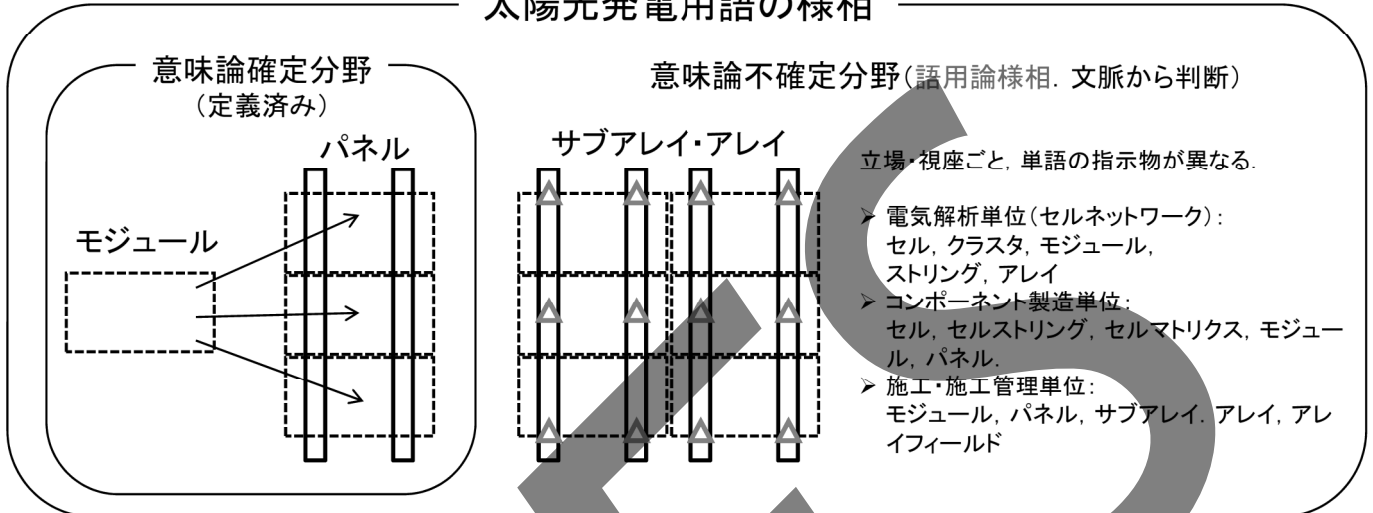
転倒モーメントを全部の振幅に含めると44倍
幅は2.55倍 知られていない。

- これらのうち, 先の三つには法令により予め安全率が見込まれている。
これを許容応力度設計と言う。
※SS400ならば, 破壊値が400N/mm², 塑性化開始が235N/mm², 比例限界が157N/mm²
- 構造計算は二つに分けて考えることができる。
それは, 「製品用構造計算」と「工用構造計算」である。
評価部位にもよるが, 必要な安全率は, 400/235(1.7), 400/157(2.55)程度, 即ち,
1.5~3倍という終局耐力試験向け安全率は, ここから合理的なものとして導かれている。
- 一方, 工用構造計算である抵抗モーメント算定には, 安全率が, 明確には定められていない。
この安全率は, 所有者と施工者が材料力学と法を勘案しそこから決めるしかない(普通は3以上)。
これが, 間違いと事故の背景の一つ。
しかし最大の原因は, それが工用構造計算でありサボられやすいことである。

用語統一のお願い

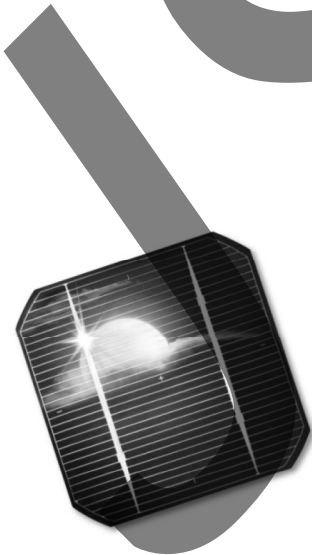
- ✓ 太陽光発電用語のうち、風工学に関係がある用語を統一し周知徹底してほしい。
 - ✓ 「太陽光パネル」って何？ モジュール？パネル？サブアレイ？アレイ？
マスコミは、以上の全てを「太陽光パネル」と呼ぶ。
 - ✓ 「ソーラーパネル」は太陽熱温水器をも含む商業用語。
この語はまた、太陽電池モジュールやパネルを表す換喩(修辞の一種)としても機能している。
 - ✓ 設計者や研究者は、用語を正しく使い分けないと仕事にならない。

太陽光発電用語の様相



- ✓ モジュール・パネルは、意味論確定済。(JISC8960太陽光発電用語 1997～. 現在2012版)
- ✓ その他は語用論扱いたが、風工学的取扱いには特段の問題はない。

23



Thank you !

太陽エネルギー学会に是非ご入会下さい。

(有)吉富電気
技術・代表取締役 吉富政宣

<http://homepage2.nifty.com/domi/index.html>
<http://pv.way-nifty.com/>

愛知県名古屋市名東区社台1-114

mail : ZVU06411@nifty.com
tel/fax : 052-760-2573
mobile : 0904-161-7171