

**千葉・山倉水上メガソーラー発電所  
太陽電池破損事故  
審議会報告（第3回）**

**2020年2月5日**

**京セラTCLソーラー合同会社**

# 目次

## 【質問内容一覧（構造）】

1. 設計風速41.53m/s 算出根拠
2. 風洞実験の概要説明（風力係数）
3. 設計風速と風力係数から最大荷重算出設計風速
4. アイランドが受ける風力荷重とアンカー1本の負担Mo枚数（荷重）
5. アンカー施工手順
6. アンカー引き抜き耐力調査結果（初期値と事故後比較）
7. 台風時の現地風速調査
8. 山倉地形でのシミュレーション
9. 山倉ダム強風時の波高計算と影響
10. 揺動の影響
  - ・ アイランド全体の偏荷重⇒解析条件
  - ・ 応力集中による偏荷重の発生
  - ・ 風速のバラツキで偏荷重の増減発生しないか確認
  - ・ 揺動、偏荷重発生時の荷重伝達のV字アンカー影響
  - ・ 接続ピンの荷重伝達
11. 破壊モードの確認
12. 接続ピン 強度確認結果
13. 調査結果に基づく事故原因の整理
14. 再発防止策と効果確認
15. 構造関連まとめ

## 【質問内容一覧（火災）】

16. 延長ケーブルの調査
17. 幹線ケーブルの調査（P N間）
18. 火災関連 まとめと再発防止対策案

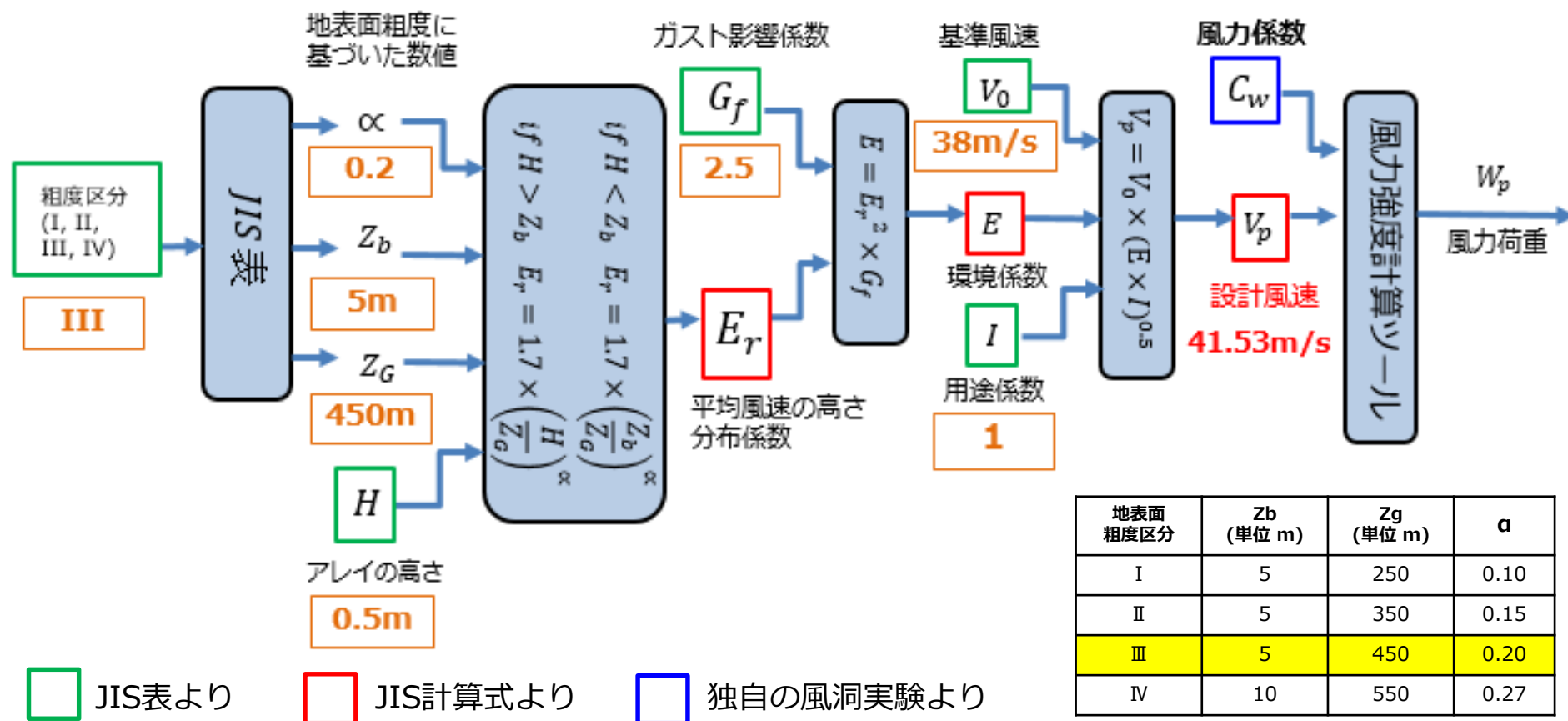
## 質問内容 (構造)

分類	質 疑		準備資料概要	参照項
風	風洞実験の内容説明 (水上設置想定)	・ 風洞実験の概要説明	フランスでの風洞実験	4
	設計風速41.53m/s の算出根拠	・ JIS C 8955 (2011)	初期アンカー設計図書より	3
	台風時の現地風速確認	・ 台風15号、19号計測データ ①平均風速 ②最大瞬間風速 (5m換算値)	山倉地形でのシミュレーション検討	9
	アイランドが受ける 風力荷重	・ アイランドのサイズと荷重 + 係留方法について設計の考え方	設計ロジックの概要	6
部品	接続ピン強度 (劣化)	・ 初期品と現地回収品を比較	せん断/引張試験予定	1 8
アンカー	アンカー施工方法	・ 作業方法、深さ、強度確認方法		7
	アンカー引き抜き耐力	・ 初期値と事故後の試験値比較	山倉現地の残存アンカーにて試験	8
	アンカー1本の負担Mo枚数	・ アイランド形状とアンカー本数 (ブロック)		6
全体	揺動について	・ 波/うねりの影響 (ベンディング) の影響を確認	波のシミュレーション	1 1
	アイランドの荷重伝達説明	・ フロート構成と係留線 応力伝達シミュレーション	解析と荷重試験で検証	12~16
	破壊モードの確認	・ 想定モードと事故モード	現地調査結果より説明	1 7

# 1. 設計風速 41.53m/s の算出根拠

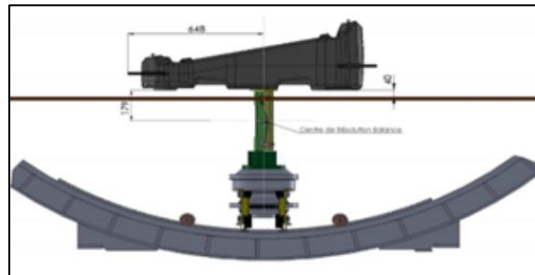
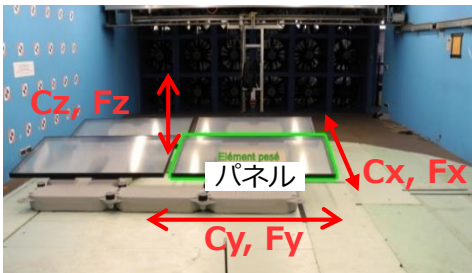
JIS C 8955(2011)+風洞実験

- 設計風速の算出は『太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算出方法』JIS C 8955:2011に基づく。
- 緑枠と赤枠の部分はJISに基づいており、青枠風力係数Cwを独自に風洞実験を行い、地表面粗度区分Ⅲに基づいた数値から、Er：平均風速の高さ分布係数を求め、ガスト影響係数を乗じたE：環境係数と用途係数、市原市基準風速は38 m/sから設計風速41.53m/sを算出。風力係数を使って風力荷重を計算致します。



### 風洞実験：水上フロート・システムの風力係数 $C_x, C_y, C_z$ を定義

- ・スケール1/1で、1枚の太陽電池パネルと1台のフロートを組み立てた単体から段3列配列までの組み合わせ条件を変えながら風洞実験を実施。
- ・実験結果に基づき、3方向それぞれの力(F)： $F_x, F_y, F_z$ の数値を求め、計算式で風力係数  $C_x, C_y, C_z$  を定義。



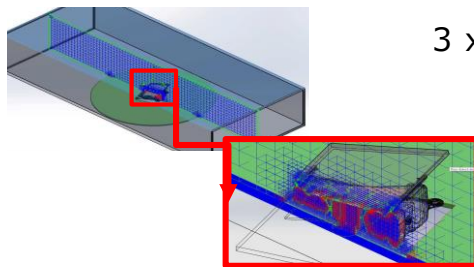
$$F_x = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho v^2 C_y$$

$$F_z = \frac{1}{2} \rho v^2 C_z$$

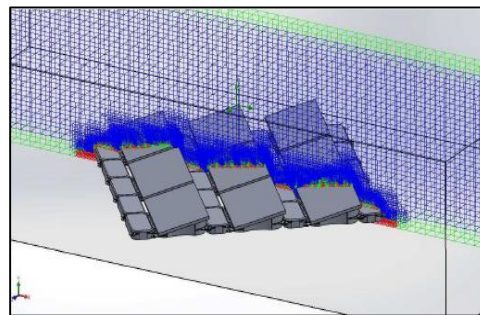
### 風洞実験の結果とCFDモデルの相関性を確認

- ・風洞実験とCFD計算の相関性を確認するため、風洞実験と同条件にて、全風向(20度ずつ)のシミュレーションを実施。
- ・シミュレーションモデルの妥当性を確認
  - 5 x 5 配列でのCFDモデルで各風向による風力係数  $C_x, C_y, C_z$  を定義。

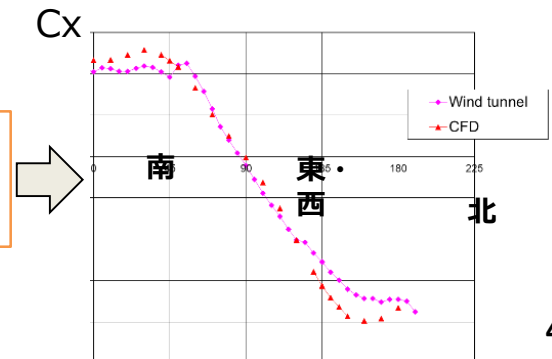


メインフロートとパネル単体でのCFDシミュレーション

3 x 3 配列でのCFDシミュレーション (例：風向 40度)

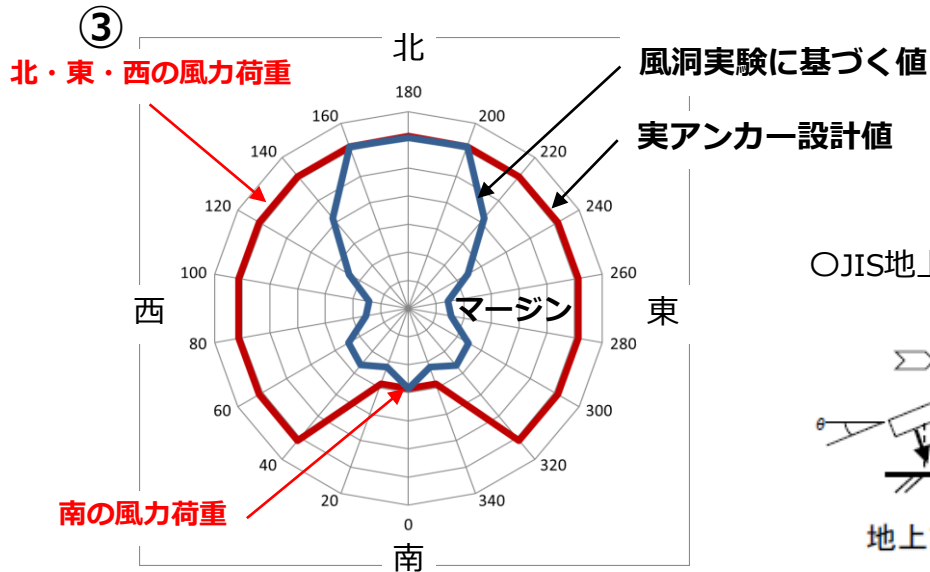
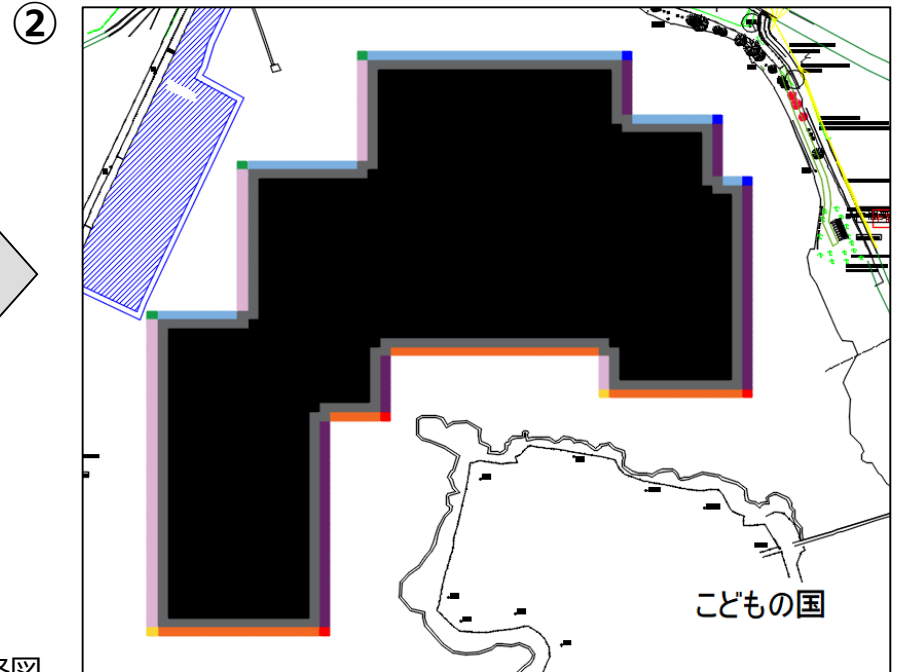
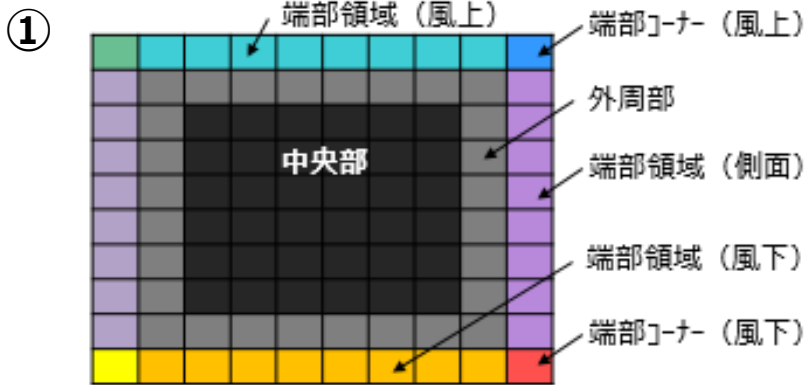


CFDモデル：  
シミュレーションの妥当性検証

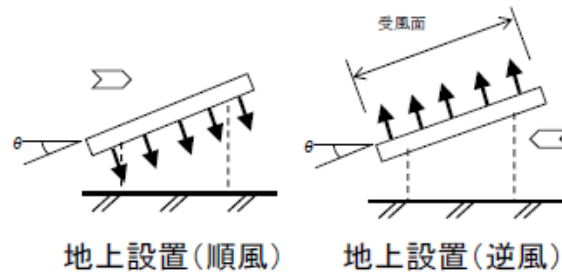


### 3. 設計風速と風力係数から最大荷重算出

- ① フロートの配置場所毎に風力係数を設定 (Cw)
- ② 山倉ダムアイランド形状で風力荷重算出 (設計風速 × Cw = 風力荷重)
- ③ 設計風速 **41.53m/s** 時にアイランドに掛かる風向別風荷重、風洞実験に基づく値は、青色線が最大荷重 → JISの地上設置型の風力係数、順風、逆風の考え方に合わせ東西方向も北と同じ設計荷重値でアンカー設計値で設計 (赤色線)。



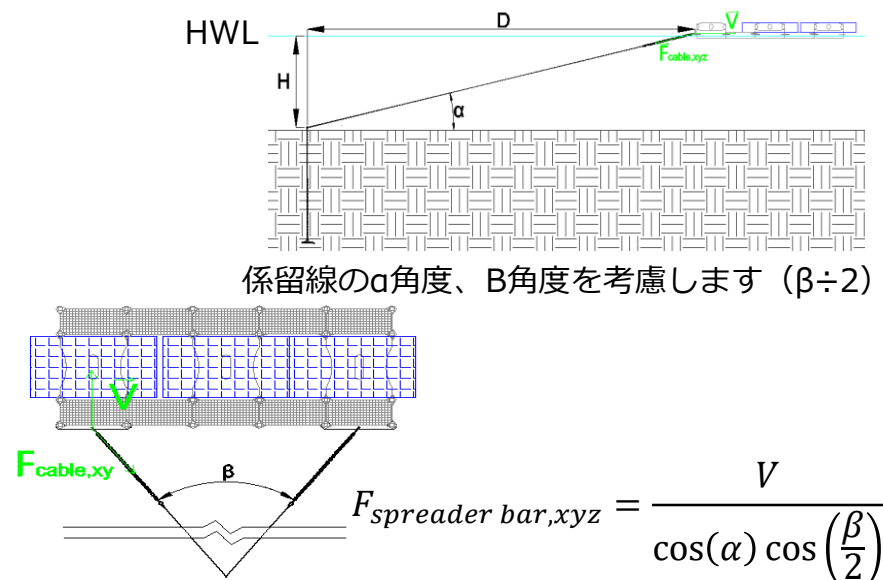
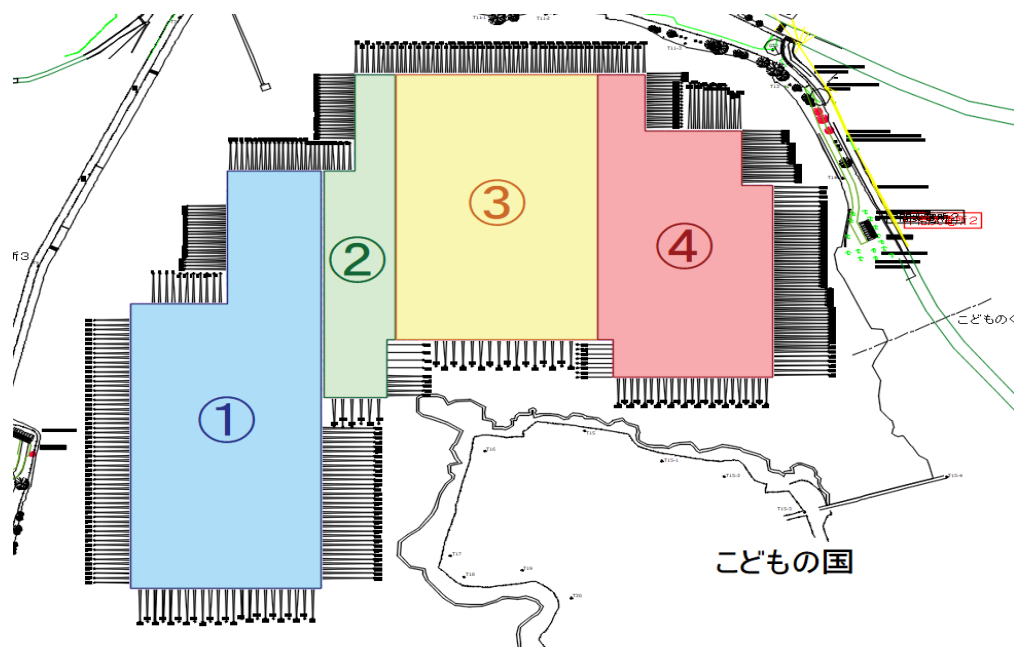
○JIS地上設置風向略図



## 4. アイランドの風力荷重とアンカー1本あたりの負担 (南側アンカー)

・アンカー1本あたりが負担する荷重は基準荷重を超えないよう設計。

※ダム湖底地層を考慮 ※係留線の $\alpha$ / $\beta$ 角度の分力計算値に安全率を乗じた最大風力荷重で計算

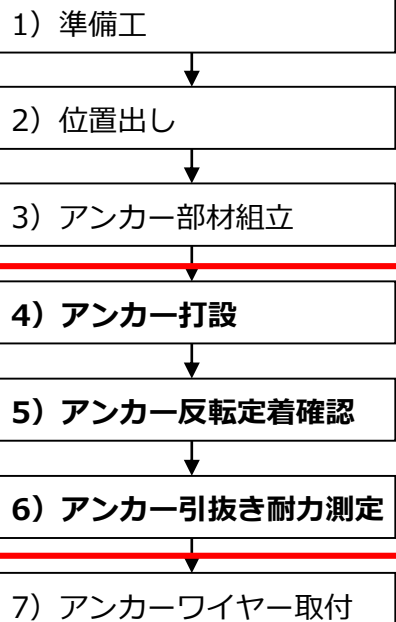


ブロック	1	2	3	4	Total
ブロック当たりのモジュール枚数	18,648	5,712	14,616	11,928	50,904枚
ブロック当たり南側アンカー本数	23	6	16	23	68
アンカー1本が負担するモジュール枚数	810.8枚	952枚	913.5枚	518.6枚	-
アンカー1本あたりに掛かる負担	強度基準値以内で設計				-

# 5. アンカー施工手順

- ・打ち込みプレートを90度反転させ定着することで引き抜き耐力を確保できるアンカーを使用。
- ・全てのアンカーは施工時に定着耐力を確認し、要求耐力以上であることを確認した。

## ■ 施工フロー

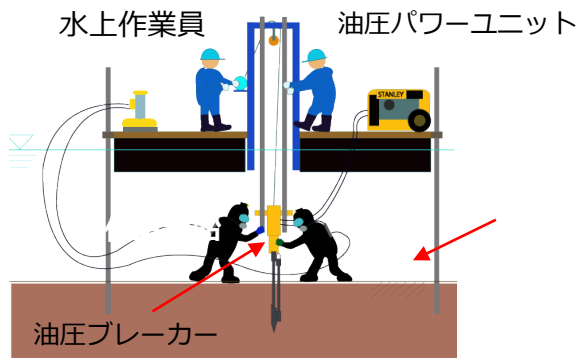


### 4) アンカー打設

専用の打込ロッドを装着した油圧ハンドブレイカーで打設を行う。

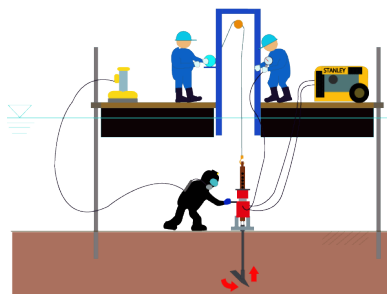


台船上からガイドを付けた油圧ブレイカーを降ろし打込ロッドをアンカーにセットし、水中で打設作業を行う。



### 5) アンカー反転定着確認

所定の深度まで打ち込んだアンカーに引き抜き用ロッドを取り付け、その上から引き抜き油圧ジャッキをセットし、反転定着を行う。



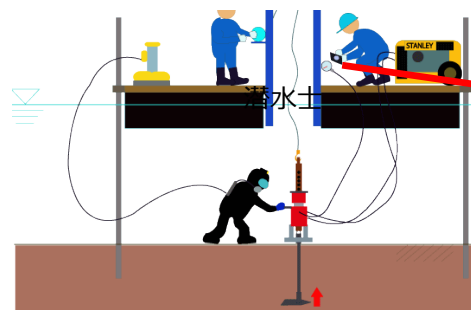
※アンカーを引き上げる事でアンカーヘッドが反転し、反力を得る。

反転定着



### 6) アンカー引抜き耐力測定

所定のアンカー耐力を船上作業者が油圧メータで確認し記録する。



メータ確認作業



メータ



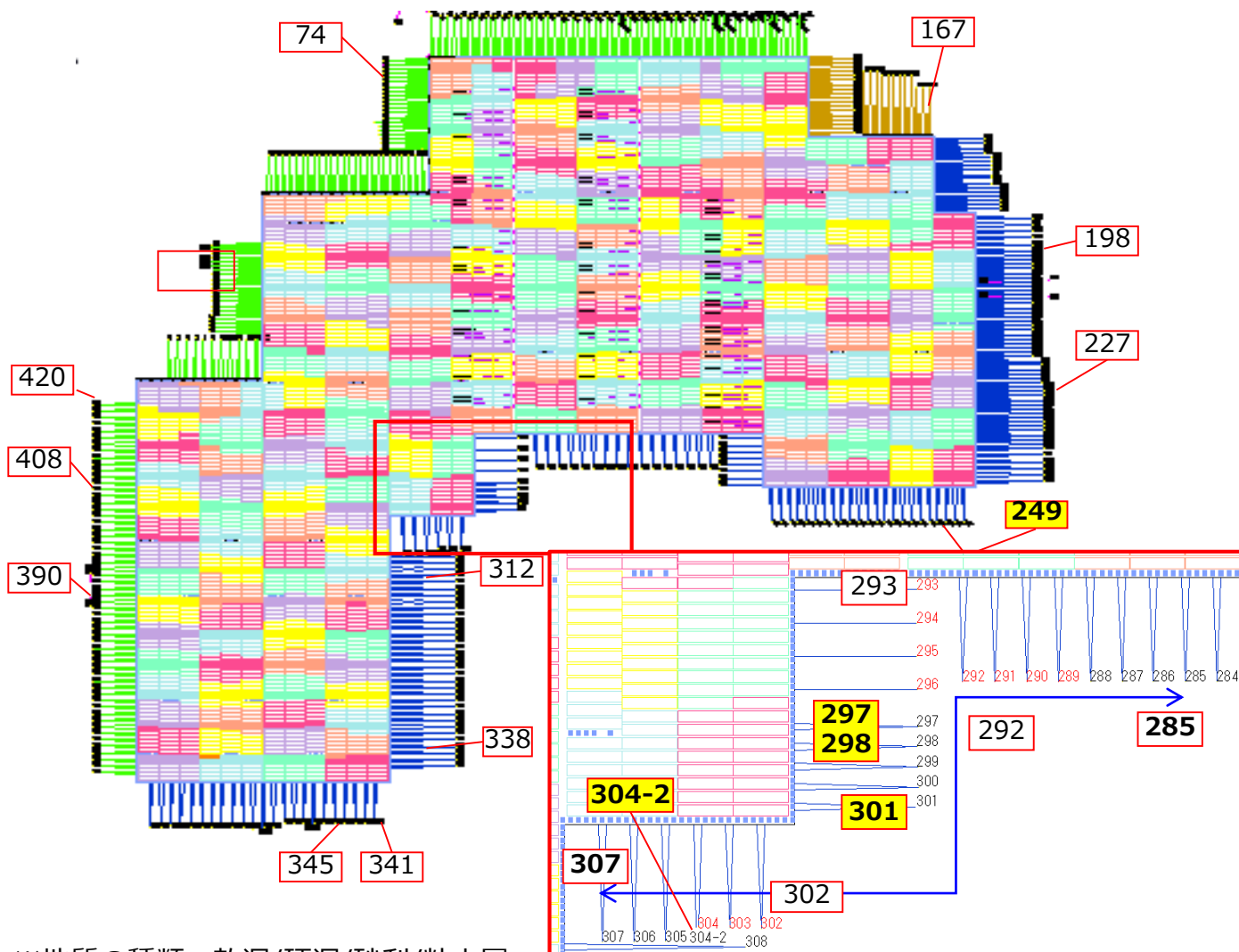
プレート





## 6. アンカー引き抜き耐力調査結果（初期値と事故後比較）

- ・応力集中が発生したアンカーNo.289~302に一部アンカー抜け、耐力の低下を確認した。
- ・その他のエリアにおいては、再引張耐力試験を実施したが問題はなかった。



No.	堆積層下	再引張耐力
285	硬泥	低下なし
286		
287		
288		
289	軟泥	抜け
290		
291		
292		
293	硬泥	低下
294		
295		
296		
297	軟泥	低下
298		低下
299	硬泥	低下なし
300		
301		低下
302		抜け
303	硬泥	低下
304		
305		
306		
307	低下なし	

※地質の種類：軟泥/硬泥/砂利/粘土層

# 7. 台風時の現地風速調査

設計風速 = 基準風速38m/s 地表面粗度区分Ⅲ 地上高5m換算 設計風速 : **41.53m/s**

- ・ 市原市は木更津に次ぐ風速を観測。
- ・ 山倉ダム周辺は市原市内と比較して少し高い値であった。(台風19号)  
⇒ ダムに近い市原市のデータには設計風速41.53m/sを上回る風速は観測されず。
- ・ 観測値は40m/s=設計風速41.53m/sとして揺動の影響を確認する。

※千葉市観測所の57.5m/sの最大瞬間風速：観測場所は地上高さ47.9mと高所に設置。  
山倉ダム設計風速の高さ5mよりも強い風が観測。  
⇒気象庁観測所と市原市内の風速観測データを同じ地上5mで換算した最大瞬間風速値が下表

	観測地	風速計 高さ	台風	観測された 最大瞬間風速	最大瞬間風速 地上高5m換算値	15号
						風向
気象庁 気象観測所	千葉	47.9m	15号	57.5	36.6m/s	南東
			19号	40.3	25.6m/s	南東
市原市 大気汚染監視 システム	五井	18.0m	15号	50.8	39.3m/s	南東
			19号	39.8	30.8m/s	南東
	郡本	15.0m	15号	50.4	40.5m/s	南東
			19号	36.4	29.2m/s	南南東
潤井戸	10.0m	15号	45.8	39.9m/s	南南東	
気象庁 気象観測所	木更津	10.1m	15号	49.0	42.6m/s	
			19号	35.9	31.2m/s	
現地観測	山倉	7.2m	15号	計測なし		
			19号	34.0	31.6m/s	

地表面粗度区分に応じた係数

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

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

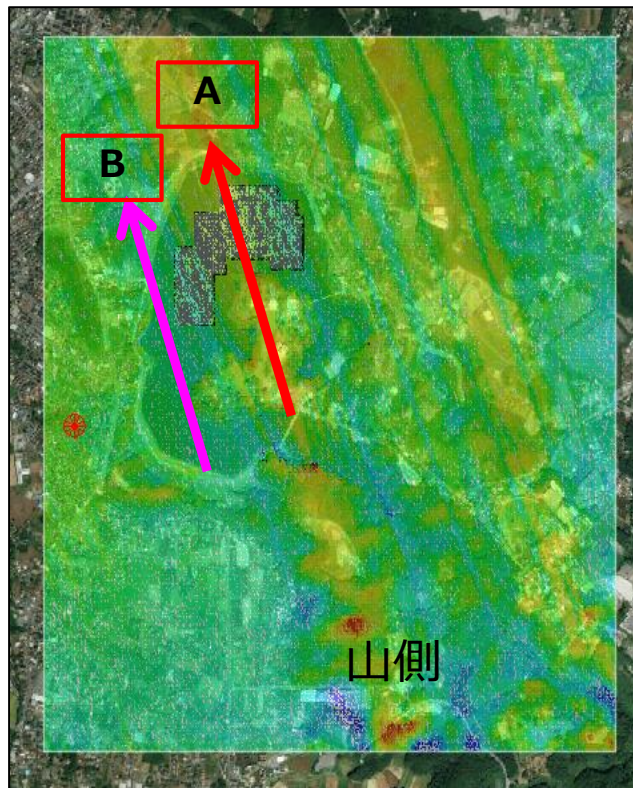
α:0.2  
Z<sub>b</sub>:5m  
Z<sub>G</sub>:450m

- 台風15号平均風速 (観測計高さ)  
(最大瞬間風速と同時刻帯)
- ・ 五井 : 20.2m/s (18.0m)
  - ・ 郡本 : 24.0m/s (15.0m)
  - ・ 潤井戸 : 14.1m/s (10.0m)
  - ・ 木更津 : 22.7m/s (10.1m)

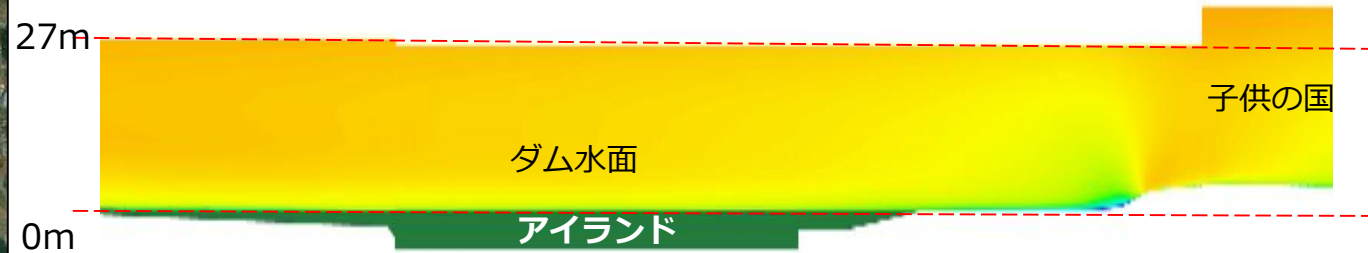
## 8. 山倉地形でのシミュレーション

- 山倉ダム付近の地形による風速配分の結果は下記。
- 地形シミュレーション結果によれば、手前の山側～「子供の国」付近で風力が強まる結果となっているが、ダム水面近くでは、風速は上がっていない。地形による影響は軽微であったと判断。
- また、建物、樹木などの影響による乱れまでは再現できず。

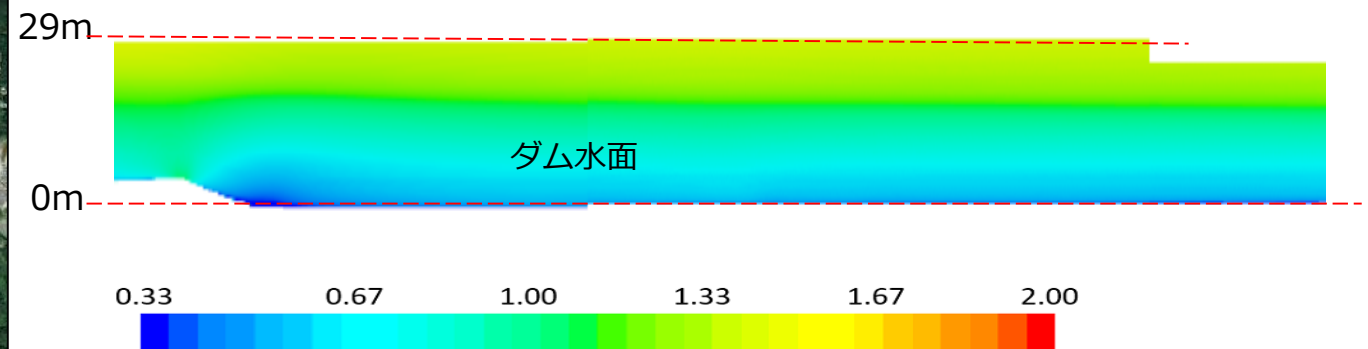
※地形の風速への影響確認 2.27km x 2.56km x 0.4kmのシミュレーション配分



高さ方向解析：A



高さ方向解析：B

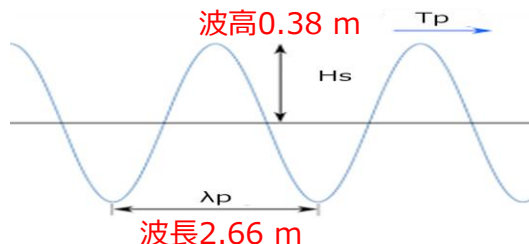


# 9. 山倉ダム強風時の波高の影響

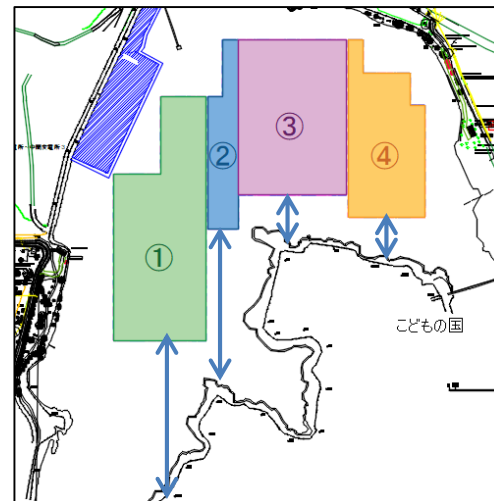
- 計算結果では最大波高は0.38m、波荷重が13.23kNであり、スプレッダーバーあたりの荷重は低い。
- 当日の近隣の平均風速は最大でも24m/s。波高は更に低かった可能性があり波の影響は小さい。

平均深さ	14.00 m
波仕様と荷重の計算方法	CEM 計算方法※

※CEM : Constrained Energy Minimization  
制約付きエネルギー最小化法



- ※エリア①の波を発生させるために必要な時間 = 平均風速35.4m/s 8.1min
- ※エリア②の波を発生させるために必要な時間 = 平均風速35.6m/s 7.3min



エリア	岸からの距離	CEM 計算方法			波荷重 (Maruo's式)	スプレッダーバー(SB)あたり加算される荷重	
		Hs 波高さ	Tp	λp 波長	Fx	SB数量	SBあたり加算される荷重
①	294.85 m	0.38 m	1.30 s	2.66 m	13.23 kN	46	波荷重による加算は +0.4 ~ +2%
②	251.11 m	0.34 m	1.24 s	2.40 m	3.62 kN	12	
③	57.67 m	0.13 m	0.78 s	0.94 m	1.92 kN	32	
④	62.74 m	0.14 m	0.80 s	1.00 m	1.56 kN	46	

台風15号平均風速 (観測計高さ)  
(最大瞬間風速と同時刻帯)

- ・五井 : 20.2m/s (18.0m)
- ・郡本 : 24.0m/s (15.0m)
- ・潤井戸 : 14.1m/s (10.0m)
- ・木更津 : 22.7m/s (10.1m)

山倉ダム台風19号写真 平均風速≒13.2m/s  
⇒計算上の波高さ : 0.12m Tp 0.88 s λp 1.2m

参考 : 棧橋の管径 : 225mm



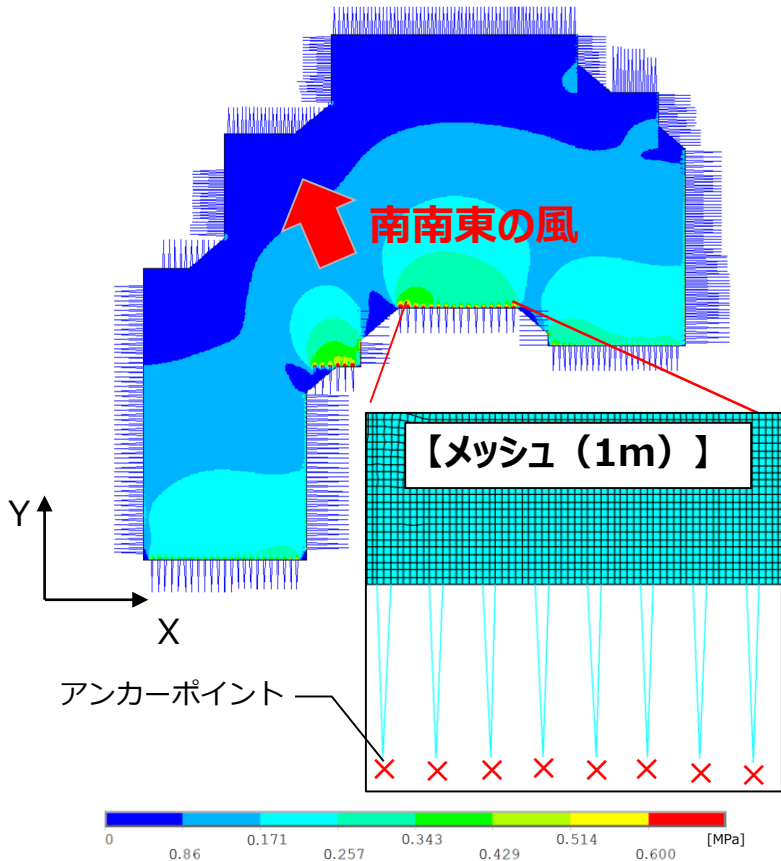
# 10. 揺動の影響

アイランド全体の偏荷重⇒解析条件

## 【解析条件】

- 設計風速41.53m/sで樹脂製フロートの揺動の影響を確認  
アイランド形状の再現⇒ アイランドの外形を模した大きな1枚の平板モデルとして樹脂材料の物性値を与えた
- 係留線の接続条件  
アイランドの外形線とアンカーポイントを結んだ1本の線を係留線として鋼製ワイヤー物性値を与えた。

## 【応力分布図】



## ○風荷重の与え方

アイランドはXY平面上で宙に浮いているものとし、  
設計風荷重相当の加速度をアイランドに与えた加速度計算  
 $\text{風荷重} / (\text{アイランドの板厚} \times \text{面積} \times \text{密度})$

## ○拘束条件

アンカーポイントの変位のみを拘束 係留線はアイランドの  
移動追従

# 10. 揺動の影響

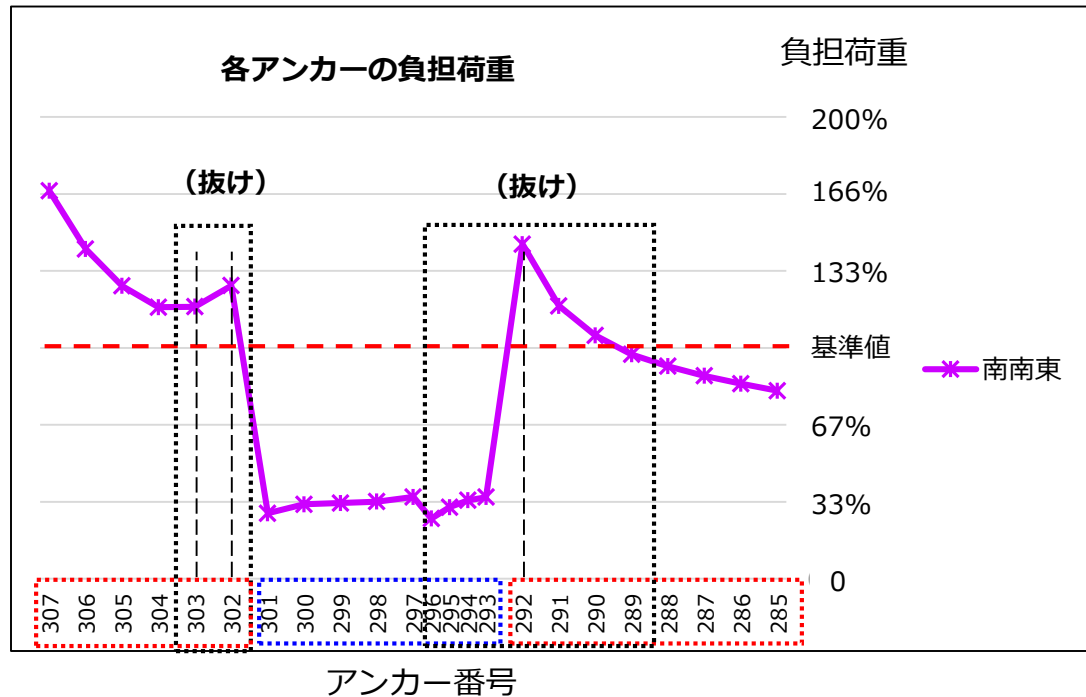
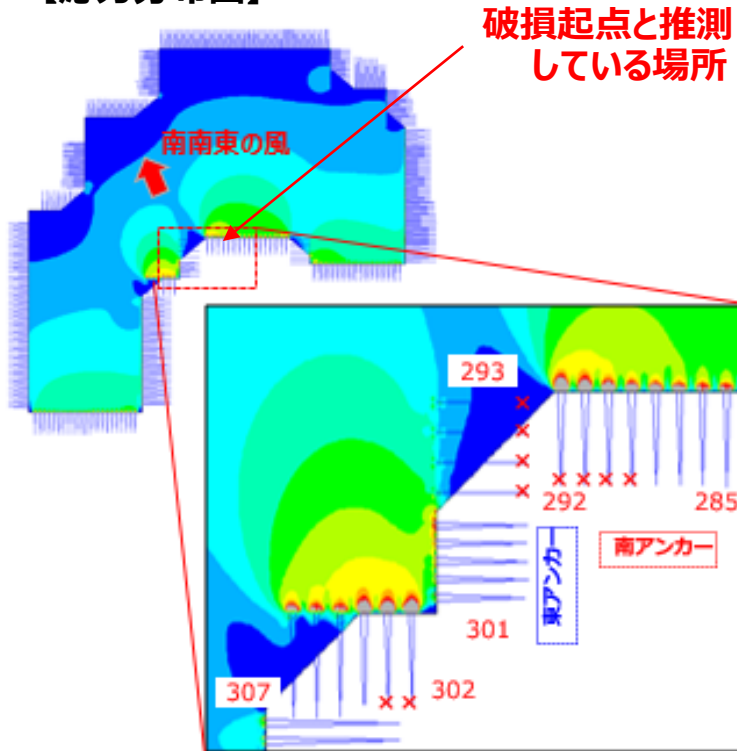
## 応力集中による偏荷重の発生

- ・樹脂製アイランドが強風時に揺動し南側中央部の段差部で応力集中部が発生した。
- ・応力集中が原因で係留線に偏荷重が発生しアンカーの設計耐力を超える引張荷重が発生した。  
⇒解析上の値がアンカー要求耐力を超えたアンカーNo.292・302が現場でも抜けていること、また接続部が破損していることから今回の破損原因、起点であった可能性が高い。

### 追加検証

- ・風速のバラツキで偏荷重の増減発生しないか確認を行う
- ・揺動、偏荷重発生時の荷重伝達の影響を確認する

### 【応力分布図】



赤枠：南側アンカー／青枠：東側アンカー／黒枠：今回抜けたアンカー

# 10. 揺動の影響

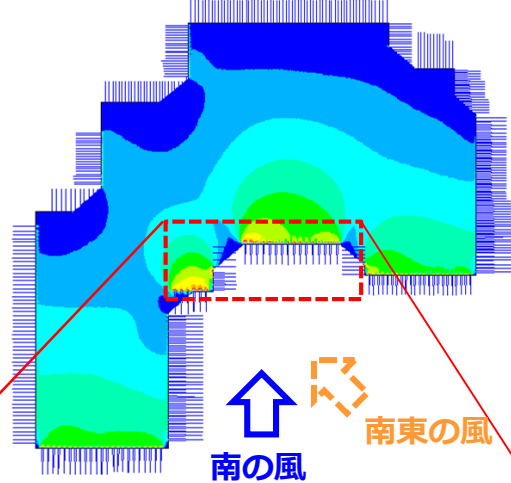
風向、風速のバラツキで偏荷重の増減発生しないか確認

- ・全面に最大風速時（南）の風荷重に対し、風向きの違い、部分的に風速が弱まった場合でも偏荷重による荷重増加はない。（南側アンカー）

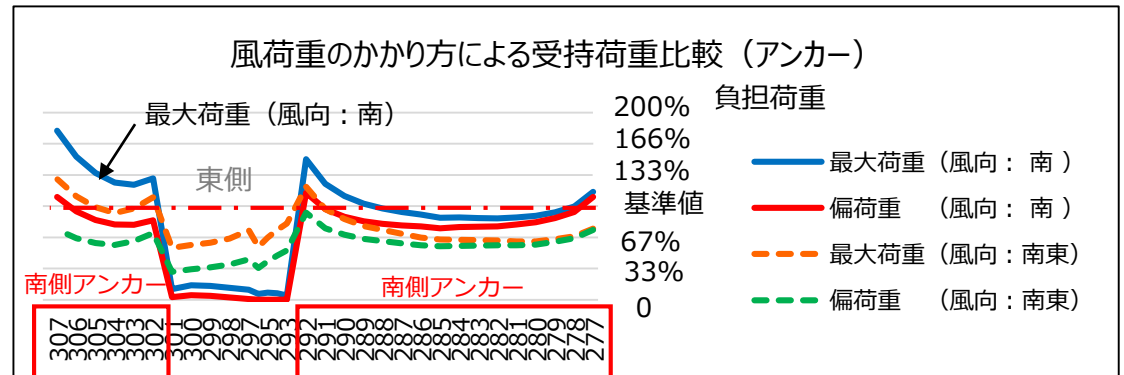
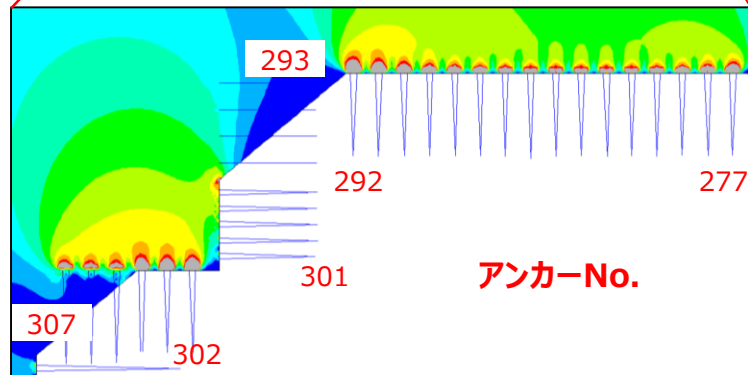
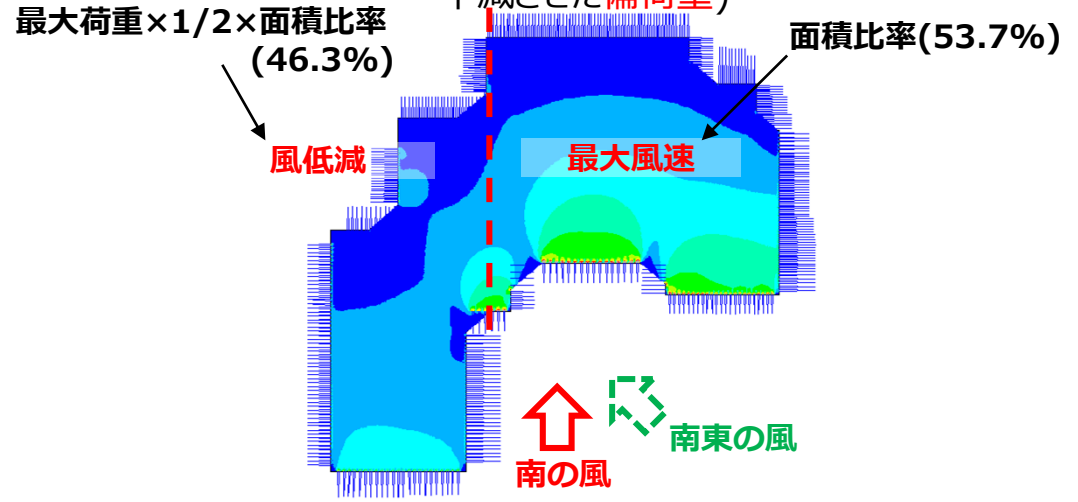
※風速のバラツキは風荷重が小さくなった分受持荷重が下がるためと考えられる。

【応力分布図】

(全面に最大風速時の荷重)



(西側の風荷重を半減させた偏荷重)



アンカー番号

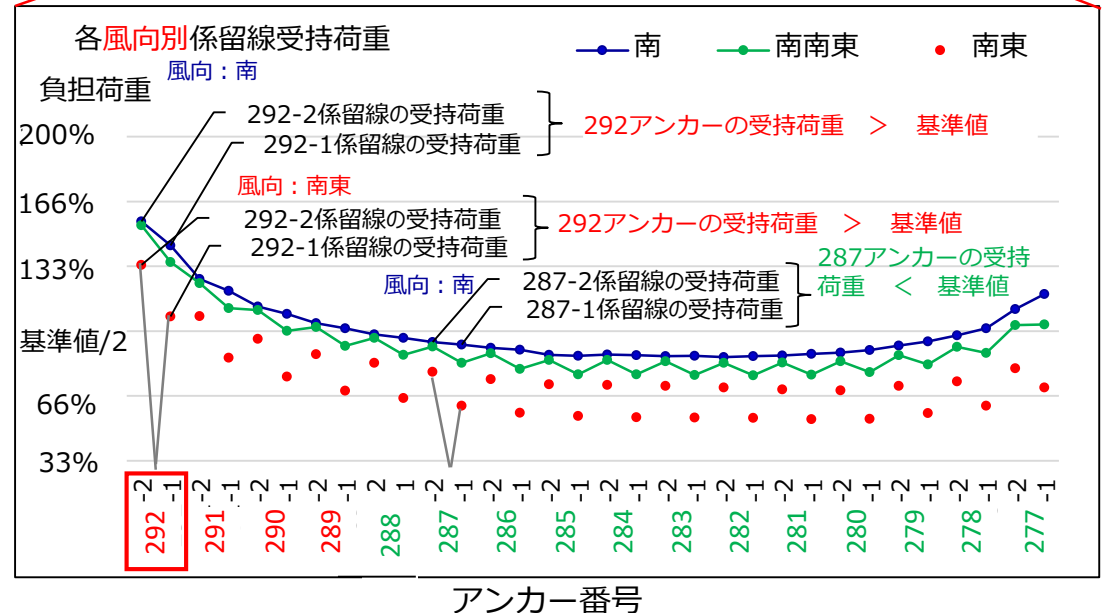
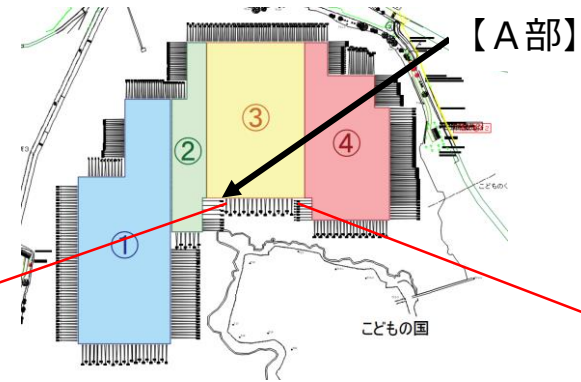
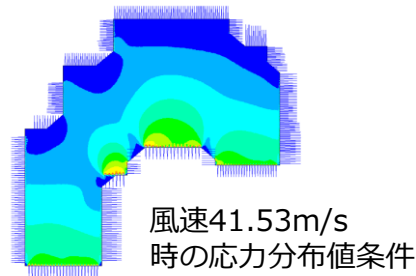
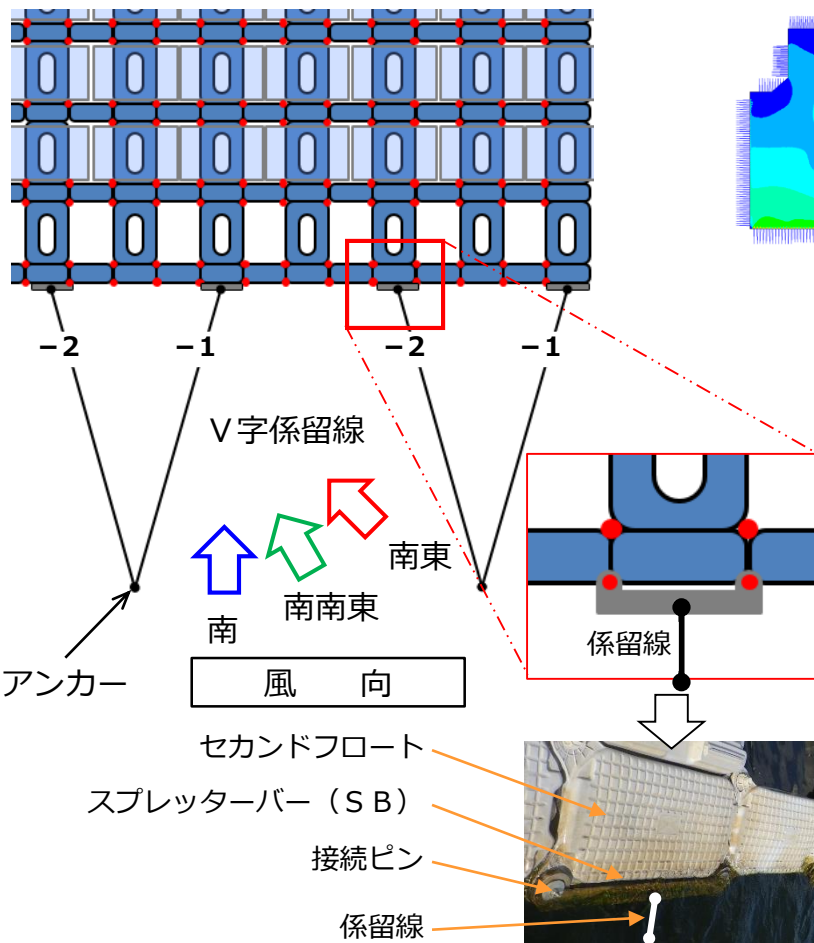
# 10. 揺動の影響 揺動、偏荷重発生時の荷重伝達の影響 (V字係留線)

## 山倉アイランド：エリア3 係留線とアンカー負担荷重

設計風速41.53m/s時の応力分布値で荷重伝達シミュレーション実施 (V字係留線とアンカー)

- ・中央部付近では荷重はアンカーの耐力値内であったが、入り隅付近【A部】では大きく超えた。
- ・V字係留線は風向が変わった場合、2本の負担割合が変化するが、南風の荷重最大値を超えることはなく、風向の変化による風荷重の変化は破断原因には直結していない。

係留線イメージ図





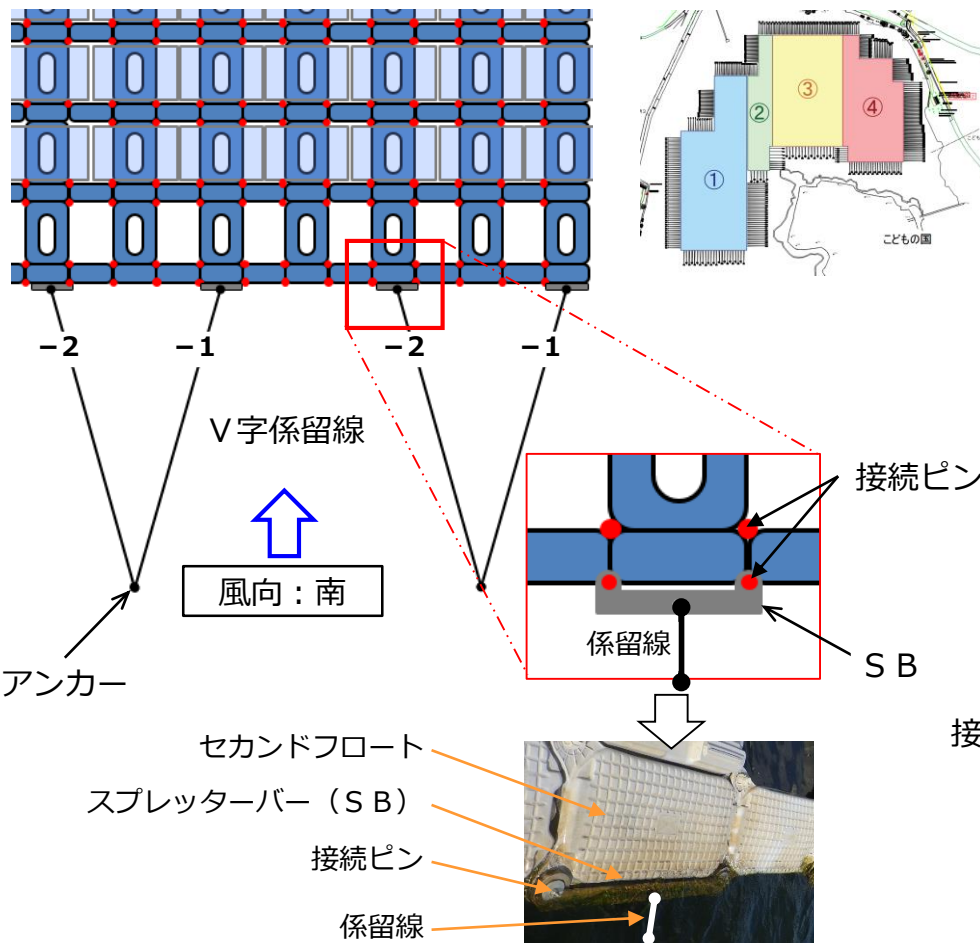
# 10. 揺動の影響 接続ピンの荷重伝達の影響

## 山倉アイランド：エリア3 係留線と接続ピン負担荷重

設計風速41.53m/s時の最大風荷重で荷重伝達シミュレーション実施（係留線と接続ピン）

- ・ 接続ピンにかかる最大荷重は係留線接続部（SB）の最外周部であり、最初の一段目は、BとC両方で100%の荷重を受け持つが、2段目以降は隣り合う接続部（AとD）に徐々に分散。
- ・ 接続ピン1本の負担は係留線負担荷重の1/2を超えない。

係留線イメージ図



<条件>

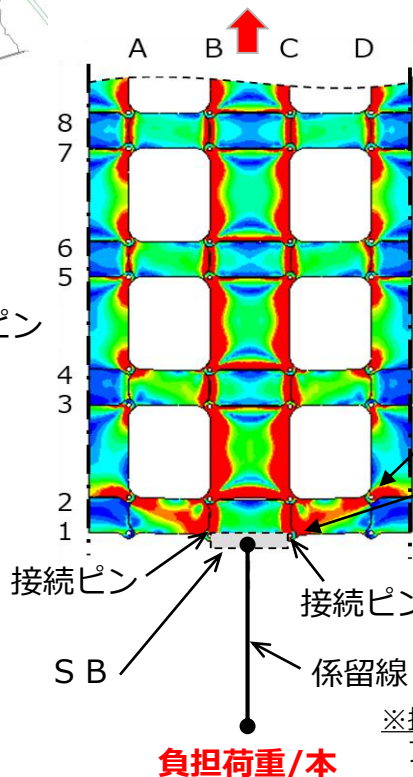
エリア3 = 44,096m<sup>2</sup>/アイランド全体 = 138,146m<sup>2</sup>

係留線1本当たりの負担荷重

= エリア3の荷重/エリア3の南側の係留線本数

フロート段数毎の荷重負担率

- ・ 上段部（北）では荷重負担は0%



- ・ 2段目以降は、隣接した接続部（AとD）に徐々に分散
- ・ 最外周部（南）では荷重負担はBとCで100%受け持つ
- ・ 接続ピン1本の負担は係留線負担荷重の1/2を超えない

※接続ピン1本当たりの負担荷重

アンカー最大負担÷係留線2本÷接続ピン2本

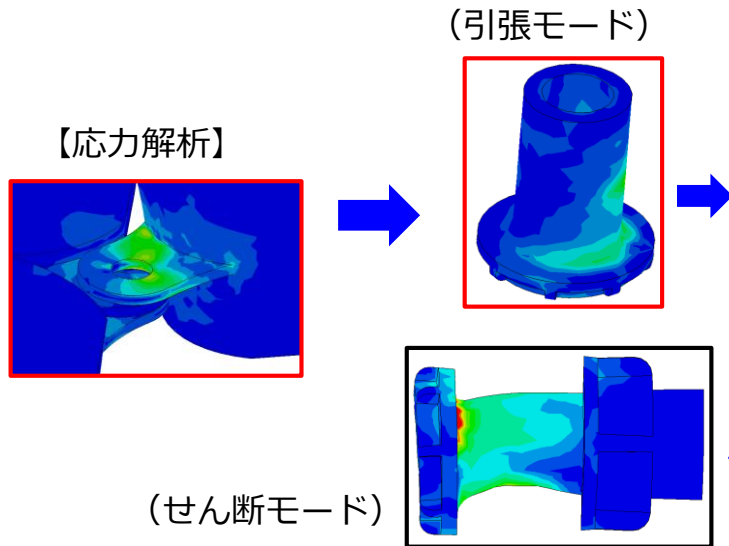
負担荷重/本

# 1 1. 破壊モードの確認

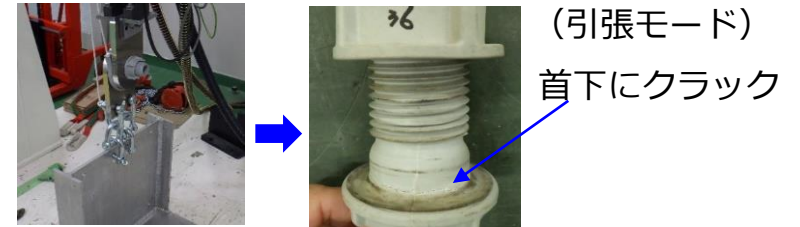
※ 1 ・ 試験場所：岐阜県産業技術総合センター ・ 試験：京セラ(株)  
※ 2 ・ 試験場所：滋賀県工業技術総合センター ・ 試験：京セラ(株)

- 解析・再現試験結果より、  
接続ピンの一般部は引張モード／スペッターバー部はせん断モードで破損。
- 接続タブは最終的に破断。現地はさらに衝撃力やねじれで耐力値超えが原因。

## 【接続ピン破壊モード】

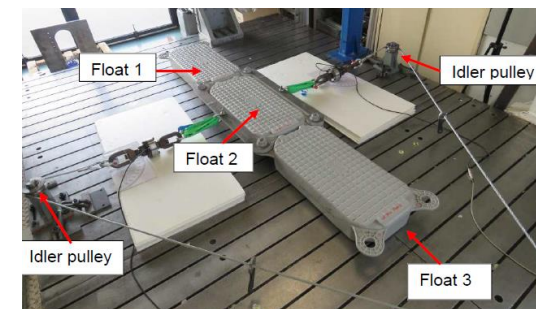


## 【一般部再現試験】 ※ 1



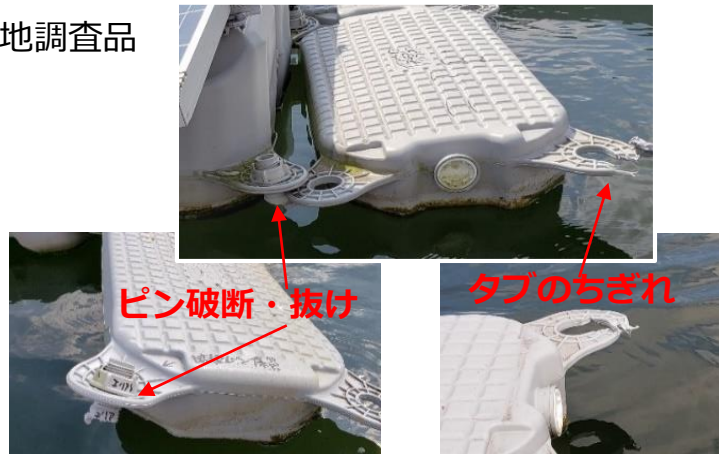
## 【スペッターバー部再現試験 (現物)】

試験：CT



## 【接続タブ破壊モード】

・ 現地調査品



## 【接続タブ引張試験】 ※ 2



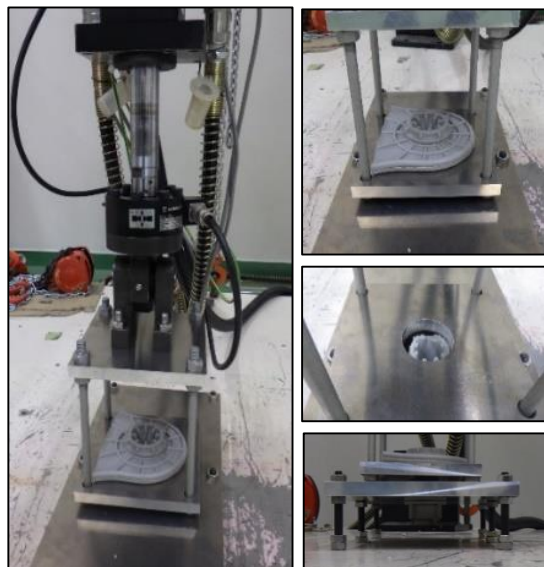
# 12. 接続ピン 強度確認結果

・試験場所：岐阜県産業技術総合センター ・試験：京セラ(株)

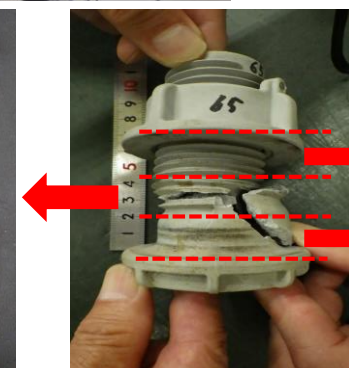
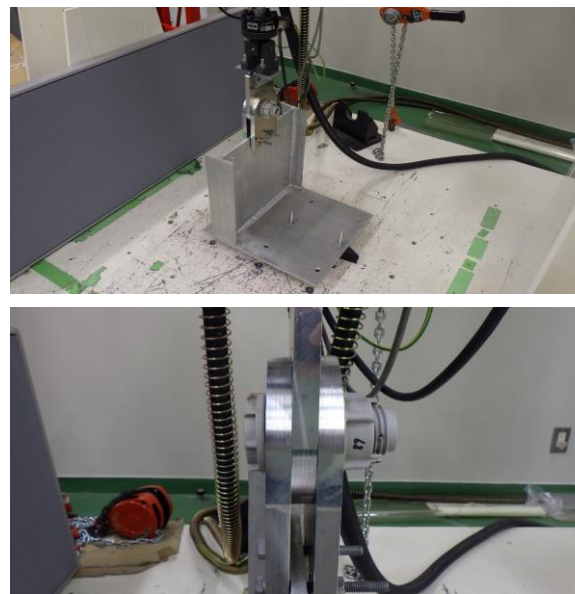
## ●山倉ダム回収品と未使用品の強度比較試験

- ・ 接続ピンの強度を検証したところ、経年劣化による強度低下はない。
- ・ 接続ピンは必要強度を有していることを確認した。

### 1. 引張試験

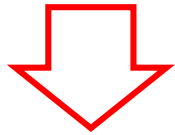


### 2. せん断試験



## 13. 調査結果に基づく事故原因の整理

- |                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| 1. 設計風速41.53m/s 超え              | → 確認できず |
| 2. 風洞実験データと風力係数の設定              | → 問題無し  |
| 3. アイランドが受ける風力荷重とアンカー1本当たりの設計荷重 | → 問題無し  |
| 4. 揺動シミュレーション結果からくる応力集中の発生      | → 対策必要  |
| 5. アンカー抜けが発生している事について           | → 対策必要  |
| 6. 地理的条件による課題有無                 | → 問題無し  |
| 7. 各接続部材の劣化の可能性                 | → 問題無し  |



### 再発防止対策への検討課題

1. 応力集中を無くすアイランド設計の必要性
2. アンカー抜けや接続部材の破損を防止する為の安全率の見直し

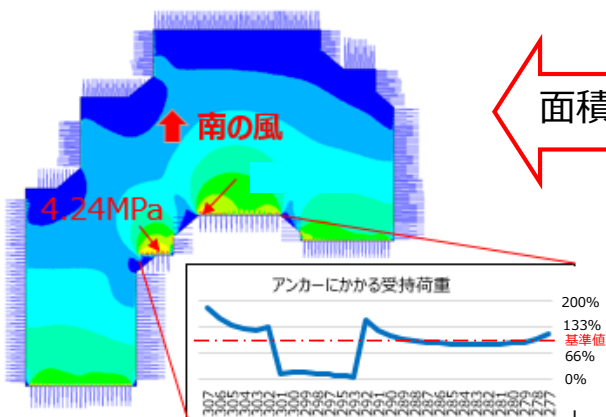
# 1 4. 再発防止策と効果確認

## ①形状変更

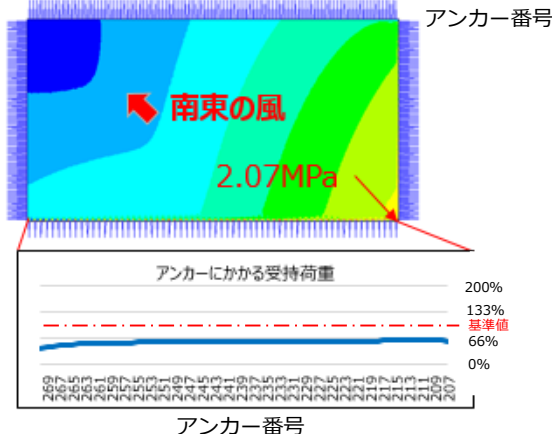
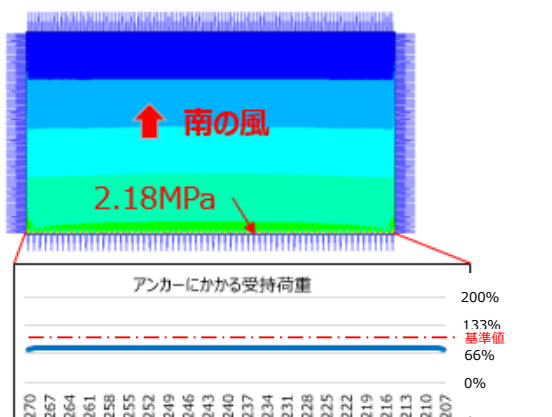
## ②小型化

- 複合形状から矩形にすることで、同じ面積、アンカー本数でもアイランド面には応力集中による偏荷重の発生リスクが減ることによりアンカー受持荷重が分散できる。
- アイランドサイズを小型化することでアイランド全体の風力荷重を下げ接続部品、係留部材の安全率を確保しやすくする。

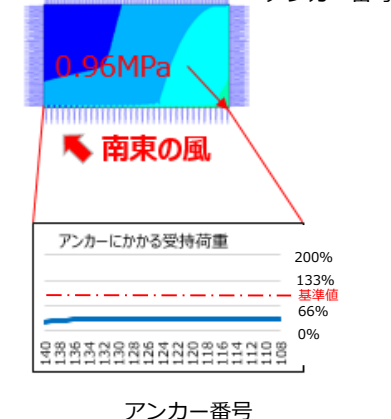
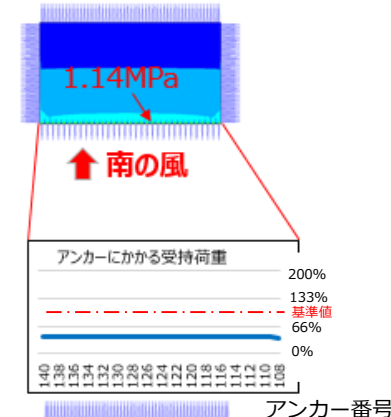
<複合形モデル(138,196㎡)>  
山倉サイズ  
風速41.53m/s 粗度区分Ⅲ相当



<矩形(大)モデル(137,205㎡)>  
山倉同等面積  
風速41.53m/s 粗度区分Ⅲ相当



<矩形(小)モデル(37,124㎡)>  
山倉サイズ1/3.7  
風速41.53m/s 粗度区分Ⅲ相当



## 15. 構造関連まとめ

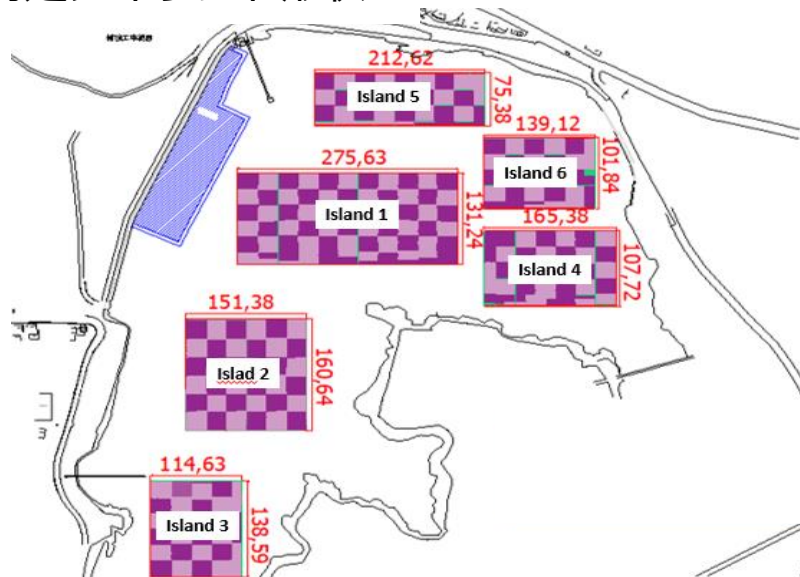
- ・強風によるアイランドの揺動が影響し、南側中央部に応力集中が発生した事が原因と特定。

### 再発防止対策案

※再建時の風圧荷重計算はJIS C 8955(2017)相当

- ・アイランドを設計する際は、応力集中が発生しない矩形形状にする。
- ・複合形状の場合はシミュレーションを実施し、応力集中が発生する箇所においても、アンカー最大荷重を試算した上で十分な耐力を確保出来る設計をする。
- ・アイランド設計時は大型化を制限し、アンカー引き抜き耐力においても安全率を確保する。
- ・今後、必要に応じて強化部材の追加設定等を検討していく。

#### ●再建アイランド形状



## 火災関連

# 質問内容一覧 (火災)

分類	質 疑		準備資料概要	市原市消防局 による確認日
火災発生 場所	・電気回路のショート場所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・火災発生場所の調査中</li> <li>・水中に沈んだ機器、焼損品を調査予定 (太陽電池、フロート、接続箱、ケーブル)</li> <li>・消防様に立会頂き、場所の特定作業</li> </ul>	・推定発生場所詳細図	12月25日 調査終了報告
火災原因	・火災の発生原因推測	<ul style="list-style-type: none"> <li>①直流ケーブルの断線によるアーク</li> <li>②直流ケーブルの短絡による直流アーク</li> </ul>	・推定内容説明	1月10日 最終立会検証終了
接続箱	・電気火災対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外箱は樹脂製</li> <li>・ストリング間はヒューズ（15A）で保護</li> <li>・地絡時はP C Sにてアラート発生</li> </ul>	・接続箱単結、外観写真	12月25日 調査終了報告
	・ヒューズの状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発火場所付近の接続箱1台を回収</li> <li>・回収した1台ではヒューズは全て導通有り</li> <li>・発火場所付近の他の接続箱の調査を継続</li> </ul>	・接続箱写真、導通確認	12月25日 調査終了報告
	・火災状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発火場所付近の接続箱1台を回収</li> <li>・水没した接続箱内部は、焼損は見られない</li> <li>・発火場所付近の他の接続箱の調査を継続</li> </ul>	・接続箱写真	12月25日 調査終了報告
消火方法	・実際の消火方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・池の水をポンプ車で汲み上げ地上より特別車にて放水</li> </ul>	・放水風景写真	-

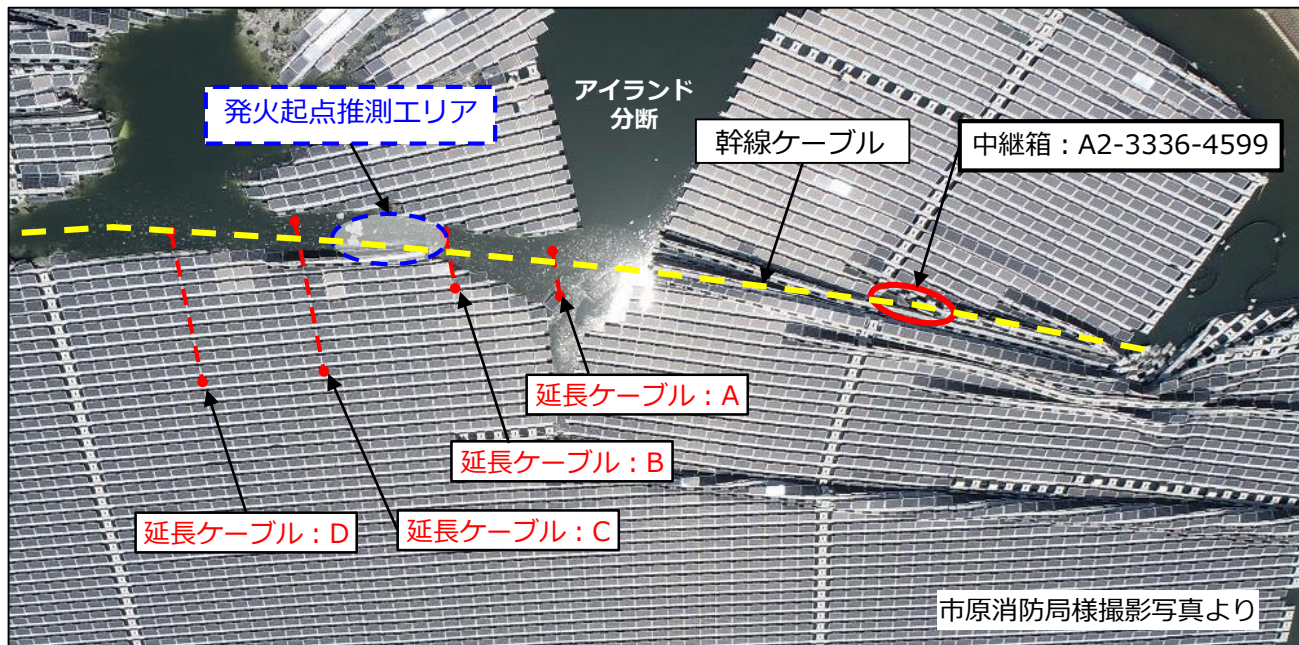


# 16. 延長ケーブルの調査

## ① 直流ケーブルの断線（延長ケーブル）

- ・ 発火推定場所には痕跡が無かったため火元ではないことが判明。

### ○ 水底から引き上げられた焼損品

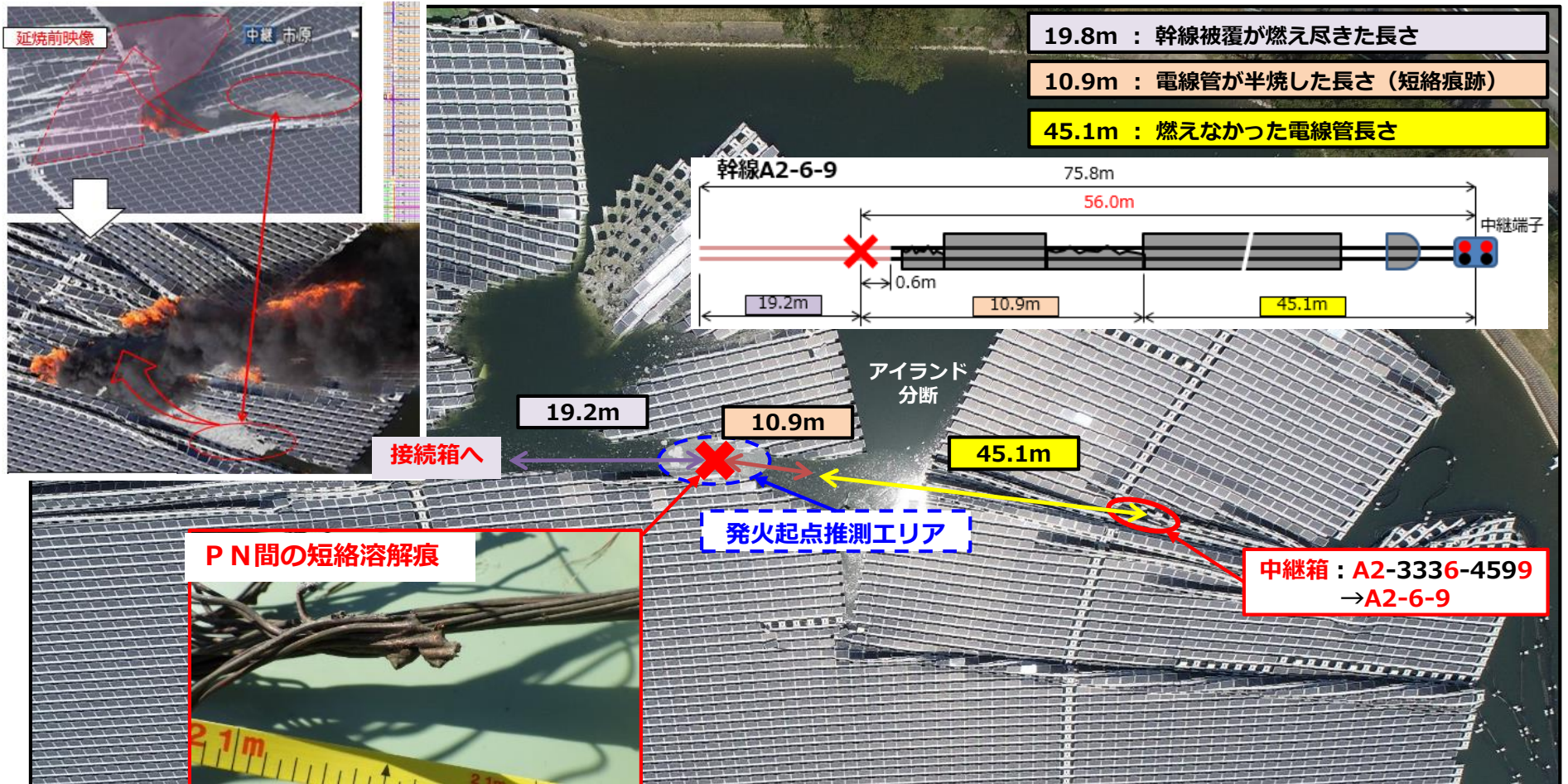


市原消防局様撮影写真より

# 17. 幹線ケーブルの調査（PN間） 発火原因

## ② 直流ケーブルの短絡（PN間） 発火原因

- ・ 幹線ケーブルのPN間の短絡溶解痕が発火推定場所から発見され、発火原因と断定した。



## 18. 火災関連 まとめと再発防止対策案

- ・火災推定エリアにおいて、接続箱と中継箱の間の幹線のP N間にアーク痕が発見されたことより、**本件の発火原因はこの幹線のP N間アークによって近傍のフロートが発火し延焼したと断定。**

補足：台風通過直後はアイランドが破断し流され、太陽電池/フロートが隆起し重なり合った状態であった。

### ○今後の再発防止対策方針

- ・アイランドの破損、隆起が起こらないための構造上の対策を実施。  
→ アイランドサイズ、形状制限、強化部品の追加など。
- ・直流ケーブル破損対策として、一緒に配置していた直流ケーブルをP N分離して配置すること破損しにくくするため、保護管に入れるといった対策を実施。