

# 浮体式洋上風力発電の合成繊維索を用いた係留系の設計について

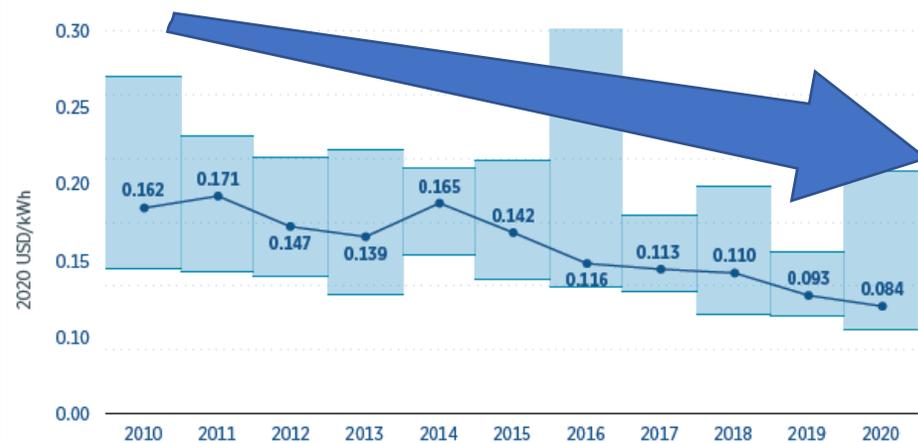
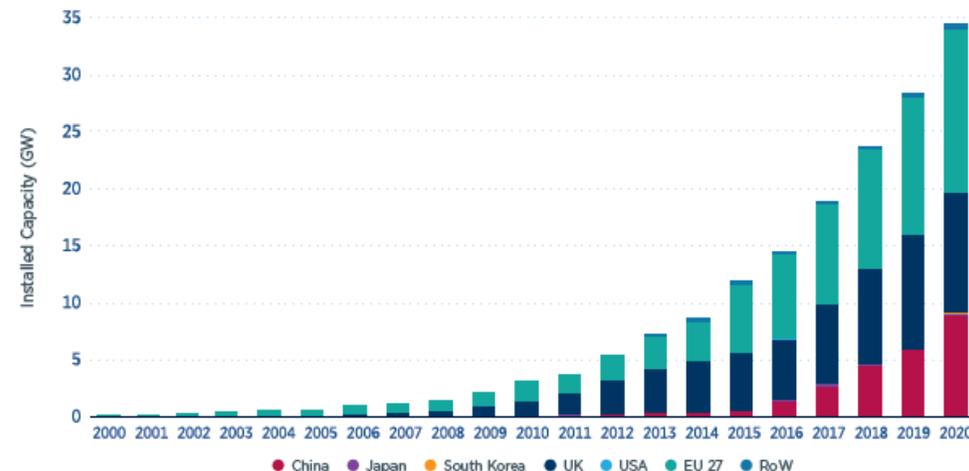
洋上風力発電プロジェクトチーム 中條 俊樹

- 背景
  - 洋上風力発電の動向
- 課題
  - コスト削減に向けた課題
- 検討内容
  - 合成繊維索を用いた係留系の設計評価手法に関する検討
- 研究成果
  - 合成繊維索係留の評価上の留意点について
- まとめ

## 洋上風力発電の動向

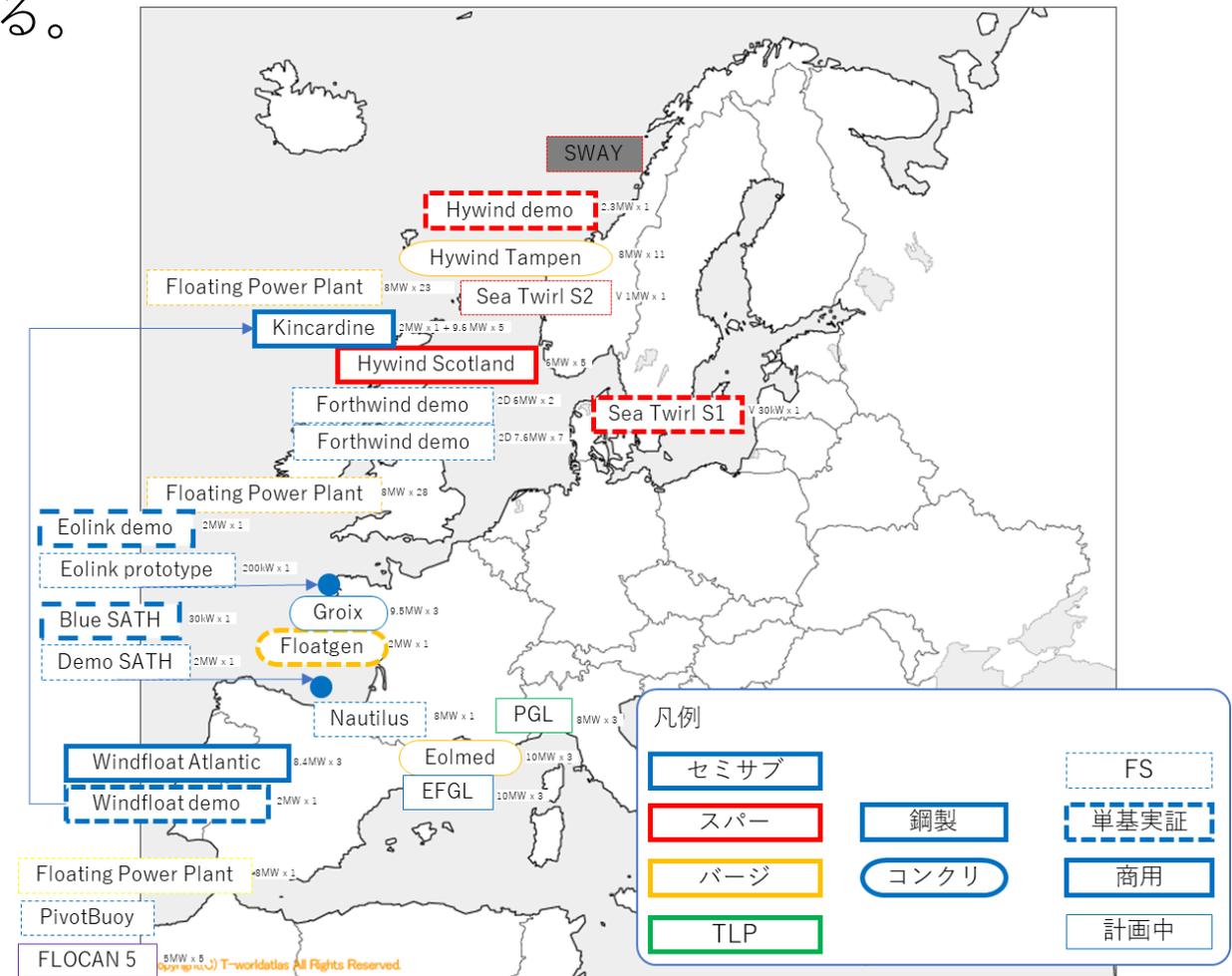
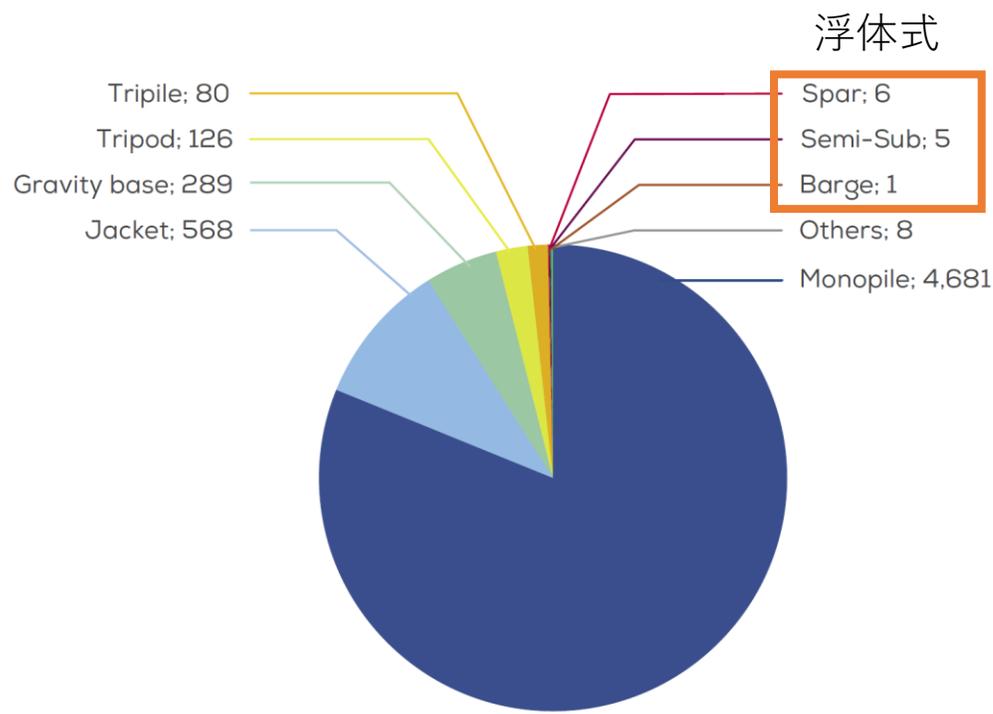
- 着床式風直発電が順調に拡大。
- 着床式の発電コストは10年前の50%に減少。
- 他の海洋再生可能エネルギーと比較し、着床式洋上風力発電の発電コストは20%~40%程度で低コスト。浮体式洋上風力発電は30%~80%と、着床式より割高だが、他の方式よりも低コスト。

大分類	小分類	発電コスト (LCoE)
洋上風力発電	着床式	2020年 0.089 \$/kWh 2023年 0.05-0.08 \$/kWh (入札データに基づく推定)
	浮体式	2019年 0.160 \$/kWh 2024年 0.13 \$/kWh (入札データに基づく推定)
海洋エネルギー	潮流	2019年 0.20-0.45 \$/kWh
	波力	2019年 0.30-0.55 \$/kWh
浮体式太陽光	静水面太陽光	2020年 0.354 \$/kWh



出典：Offshore Renewables Action Agenda for Deployment (IRENA)

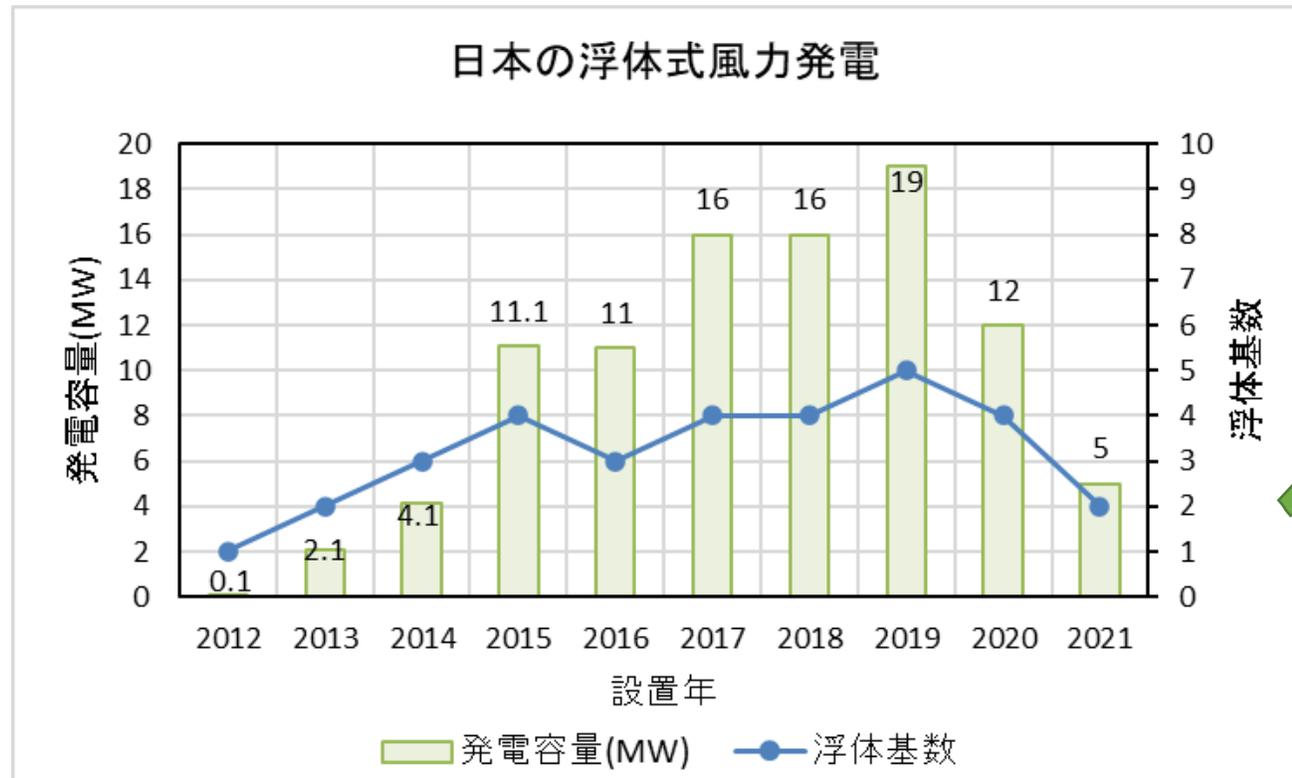
- 浮体式洋上風力発電の動向
  - 導入量は着床式風直発電に比べ小さいが、新規プロジェクトが増加、かつ大規模化。
  - 商用のウィンドファームの運用が開始されている。



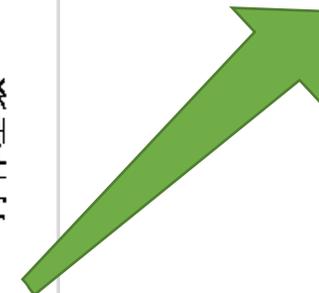
出典：Offshore Renewables Action Agenda for Deployment (IRENA)

出典：[https://www.thewindpower.net/index\\_en.php](https://www.thewindpower.net/index_en.php), <https://www.4coffshore.com/>

- 我が国の浮体式洋上風力発電の動向
  - 福島の子体撤去により導入量は減少。
  - 国による導入目標の設定。
  - 2030年までに1,000万kW, 2040年までに浮体式も含む3,000万kW~4,500万kWの案件を形成することを目標（洋上風力産業ビジョン）。



上昇するか？



- 導入拡大に向けた課題
  - 発電コストの低減
    - ⇒着床式並みの0.08 \$/kWh (8円~10円/kWh) に下げられるか？
  - どこをコストダウンするか？

### 洋上風力サプライチェーンのコスト構造 (欧州の着床式の例(※))

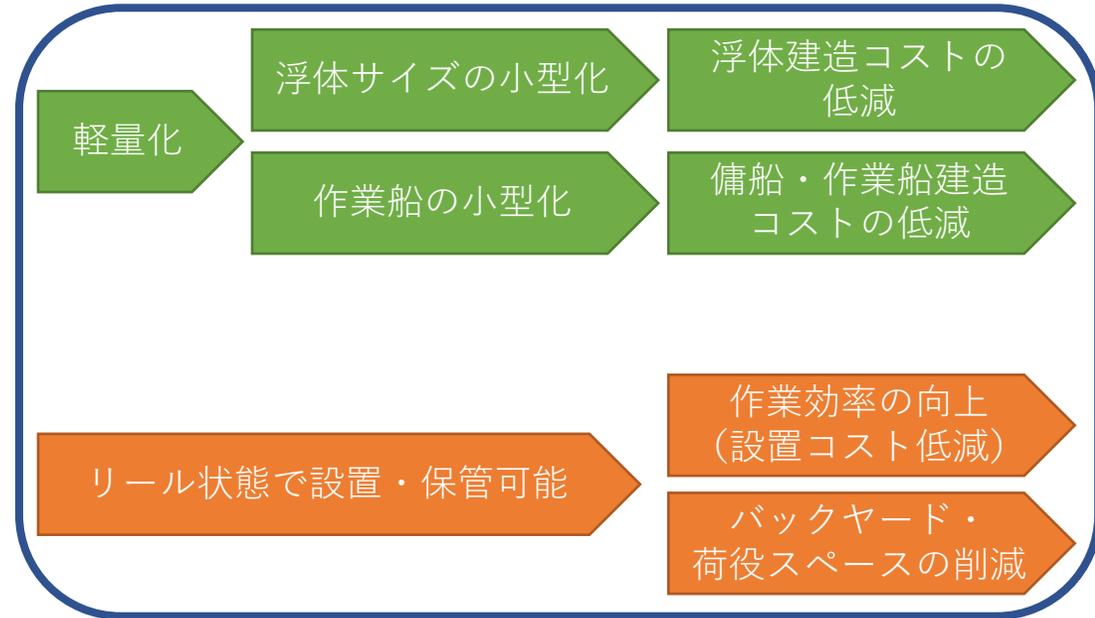


- 係留系に合成繊維索を使用する場合の技術的課題 (Carbon Trustレポートより抜粋)
  - 合成繊維索の基準の合理化
  - 浮体式風車の係留システムの疲労メカニズムの解明
  - 係留モニタリングシステムの実装

# 合成繊維索係留の特徴と課題

## 特徴

- 軽い
  - 浮体や作業船をコンパクトにできる。
  - 港湾インフラへの負担軽減。
- 材料が多様で、それぞれの特性を生かす設計が必要。
  - ポリエステル系：耐水性に優れる
  - ナイロン系：伸びが大きい
  - ポリエチレン系：伸びは小さく、高強度
  - 等
- 海底面との接触を避ける必要がある。
  - トート係留形式の採用や、アンカーとの接合部にチェーンの使用が想定され、係留形式によっては海域専有面積の縮小が可能となるケースも考えられる。



## 課題

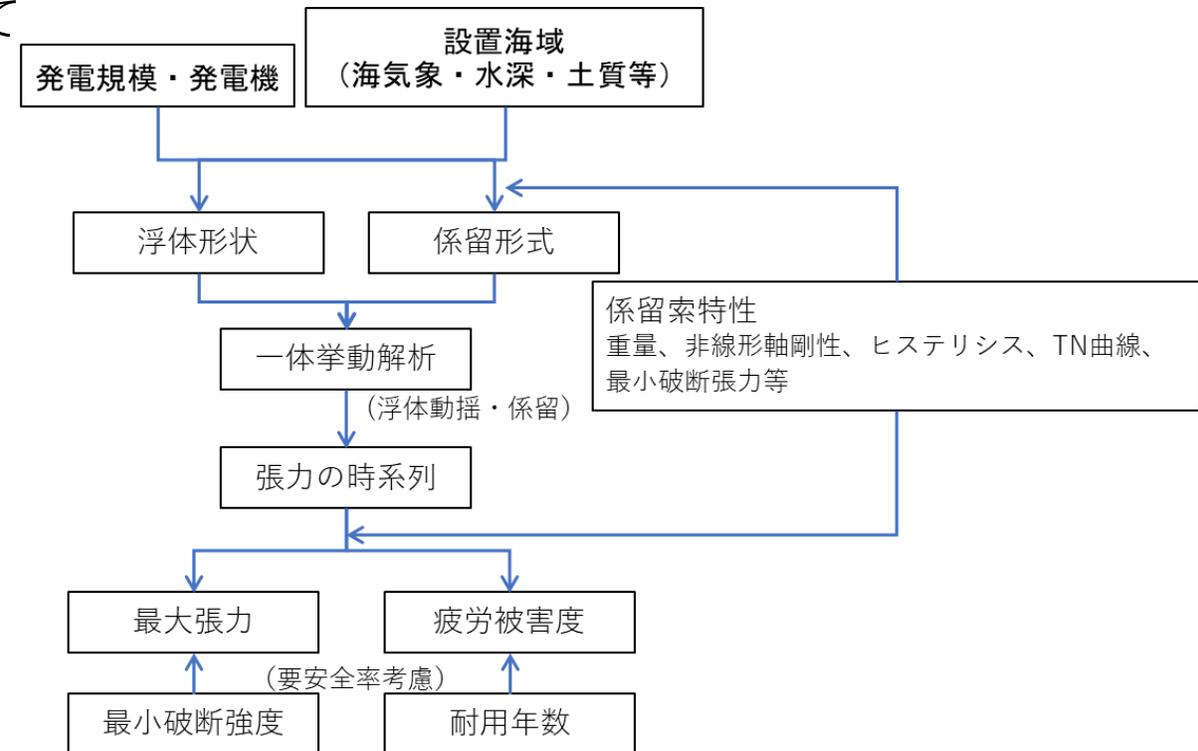
- 材料によっては使用実績に差があり、基準等の記載も異なる。
- ナイロン系は疲労強度評価が不十分。
- 生物付着による影響（重量増、強度低下等）が未解明。

- 浮体式洋上風力発電施設の係留系の設計評価手法に関する以下の検討を実施。

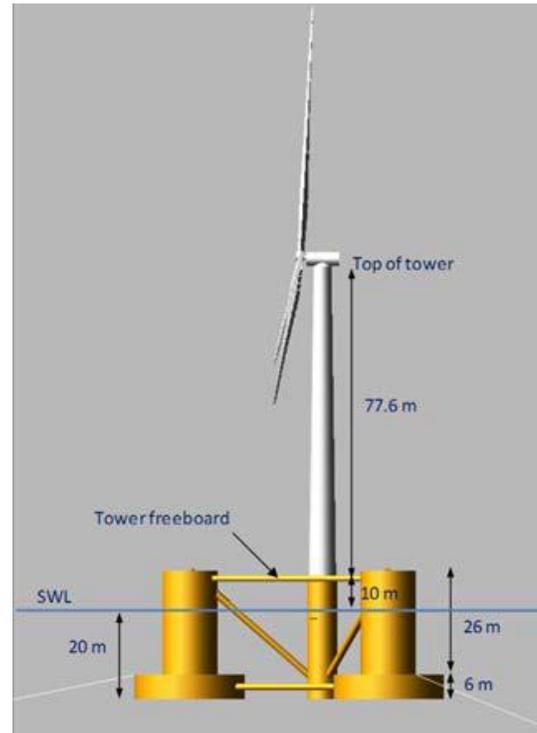
1. 浮体・風車の連成を考慮した係留解析手法、強度の評価方法の検討
2. 合成繊維索の破断強度、疲労強度の試験方法の検討
3. 付着生物の影響や保護層の効果の評価方法の検討

- 2.、3.については下記等を参照ください。
  - 疲労試験について
    - 穴井ら、合成繊維索の安全ガイドライン化に係る検討、令和2年度（第20回）海上技術安全研究所研究発表会講演集
  - 生物付着について
    - Chujo. Et al., Investigation of Biofouling on Synthetic Fiber Rope for Safety Criteria of Floating Offshore Wind Turbines Mooring Design -Investigation in Hokkaido-, Underwater Technology 21

- 非線形性影響の把握
  - 軸剛性の非線形性の影響について
- チェーン・合成繊維索・ブイ・シンカーを組み合わせた複合係留における合成繊維索評価上の留意点の抽出
  - ① 風・波・流れの入射方向の組み合わせについて
  - ② 波の方向分布の影響について
  - ③ 最大張力となる海象条件について
  - ④ 最大張力の発生箇所について
  - ⑤ 最大張力推定のための解析回数について
  - ⑥ 最大疲労被害度の発生箇所について

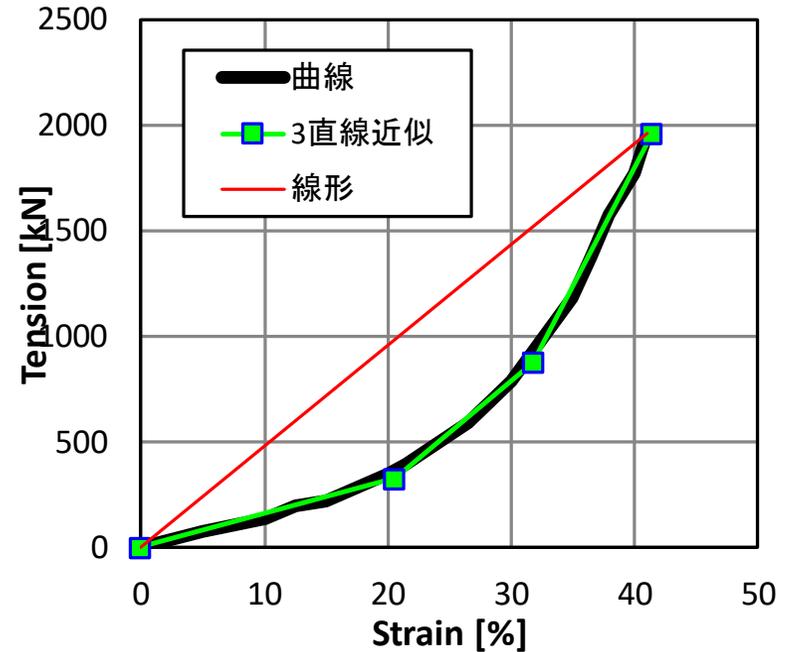
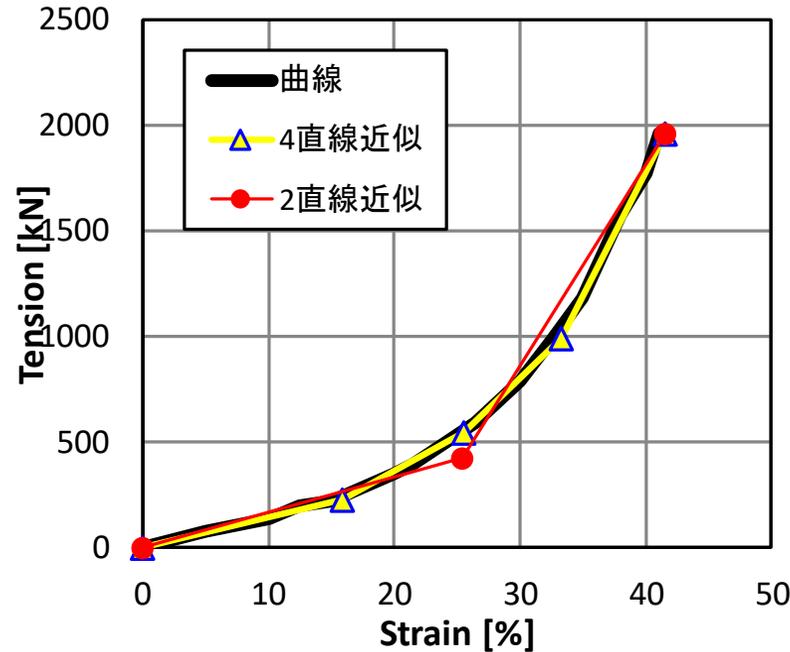
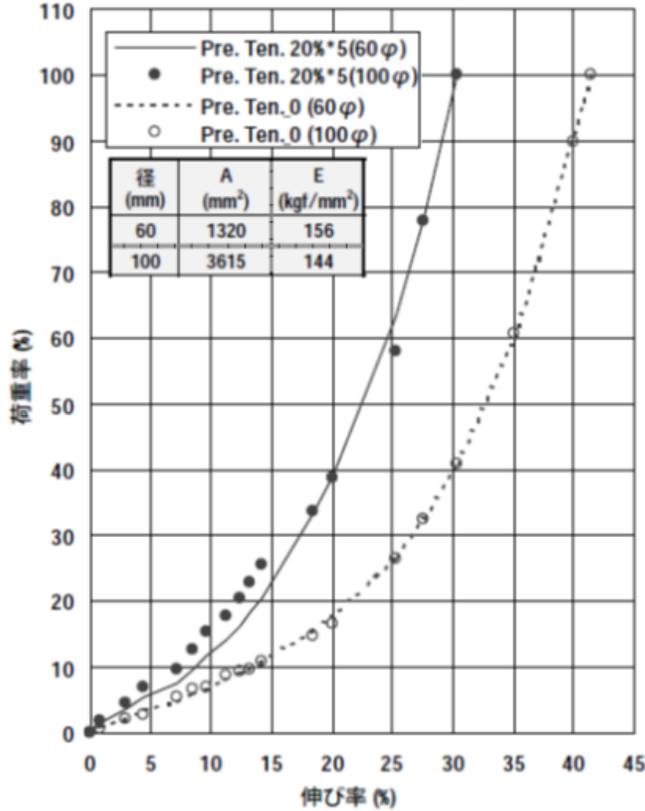


- 数値計算モデル
  - OC4 (Offshore Code Comparison Collaboration Continuation : IEA Wind Task30における、共通の計算対象を用いた数値計算コードの比較検証プロジェクト) のDeepCwindモデルを対象とした。
- 数値計算コード
  - Orcaflexを使用し、計算結果はOC4の計算結果 (FASTとOrcaflexの組み合わせ) と比較し、結果の一致を確認。



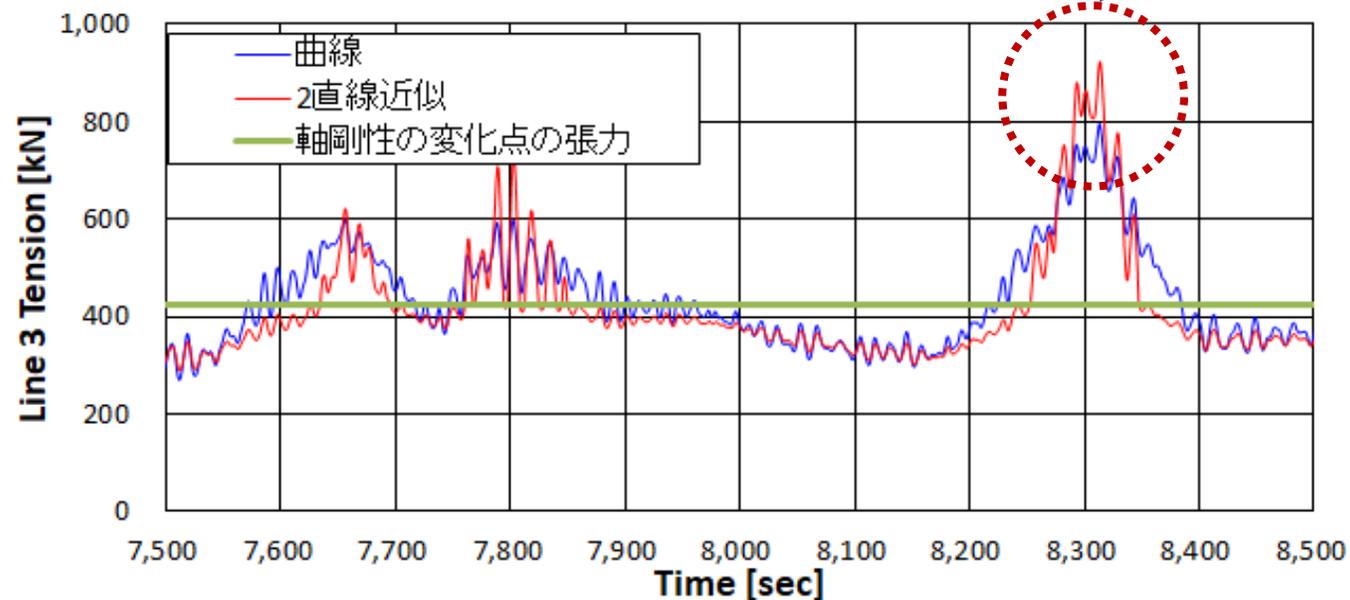
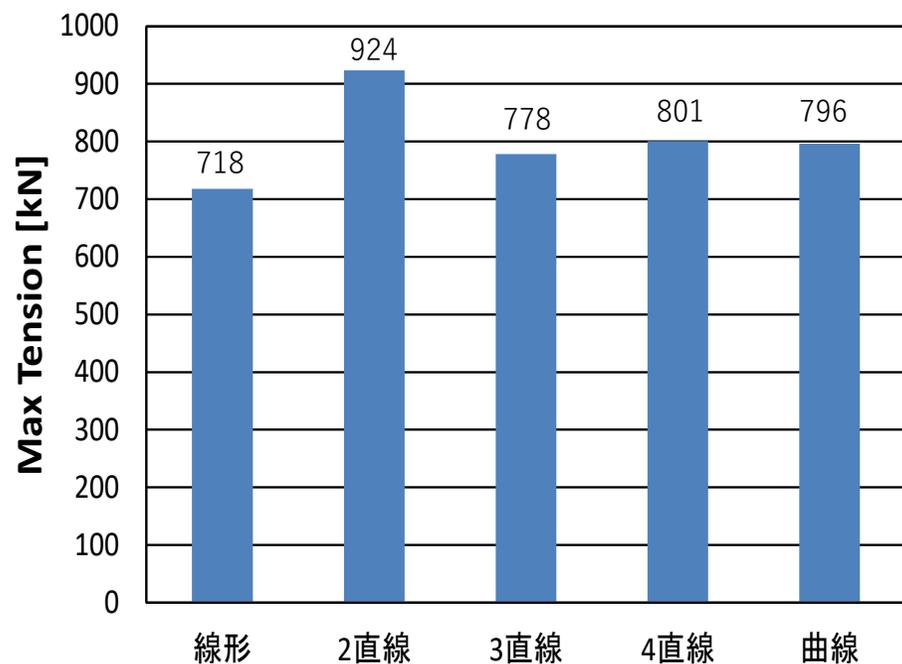
- OC4浮体をナイロン製繊維索を用いてトート係留したモデルを解析。
  - 合成繊維索の変位－張力特性に対し、複数の近似モデルを用いて解析し、最大張力を評価した。

ナイロンエイトロープ



近似モデル

- OC4浮体をナイロン製繊維索を用いてトート係留したモデルを解析。
  - 最大張力の評価では、2直線近似では過大評価となり、線形近似では過小評価となった。
  - 4直線近似と曲線近似ではほぼ同じ最大張力となった。
  - 非線形性の強い合成繊維索については、4直線程度で近似すべき。

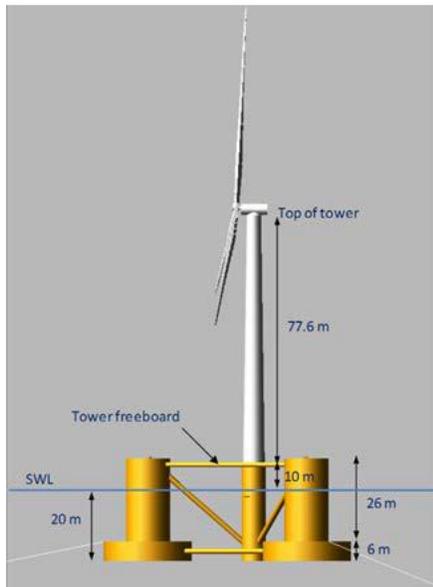


## • 検討条件

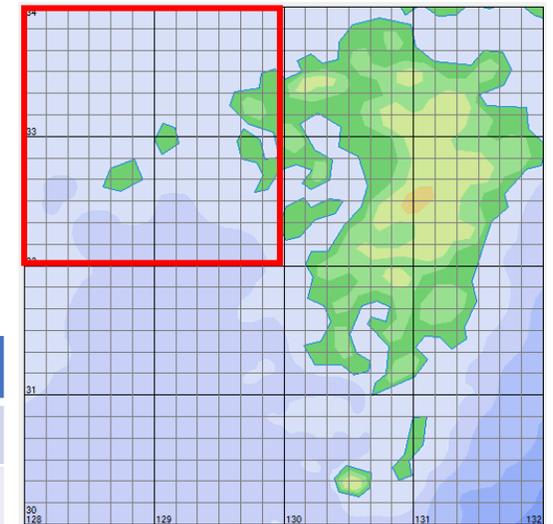
- 想定浮体：OC4浮体。
- 想定海域：再現期間50年の有義波高を約10mと設定し、九州北西海域と仮定した。

## • 係留試設計

- (A)チェーン・合成繊維索（ナイロン）・ブイ・シンカーを組み合わせた複合係留を試設計。
- 比較のため、(B)チェーン・合成繊維索（ナイロン）を組み合わせたカテナリー係留、(C)チェーンを用いたカテナリー係留の試設計を併せて実施。



再現期間	有義波高	有義波周期	平均風速	平均流速
50年	9.30m	12.95s	35.15m/s	0.75m/s
10年	6.79m	10.97s	28.79m/s	0.61m/s

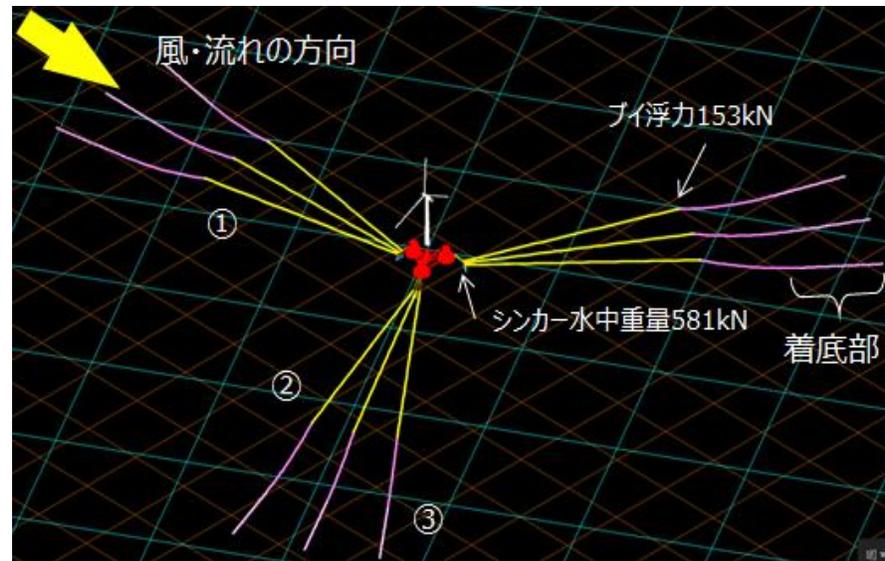


# 研究成果－合成繊維索係留の評価上の留意点－

## • 複合係留の試設計条件

- 周波数領域（スペクトル法）により設計。
- 風車のスラスト荷重を一定と仮定し、準静的張力を使用。
- 浮体側の係留取り付け点とアンカー一点の深度差を50mとした。（水深は64m）
- チェーンと合成繊維索（ナイロン）のMBL（最小破断荷重）を一致させた。
- ナイロンロープの軸剛性：既存エイトロープ特性を利用。
- 目標値  
最大張力：30%MBL、最大変位：水深の15～20%とした。

## • 試設計結果



項目	仕様	
係留本数	9本	
上部チェーン	長さ	25m
	径	81mm
	MBL	5490kN
ロープ(ナイロン)	長さ	300m
	径	167mm
	MBL	5472kN
下部チェーン	長さ	270m
	径	81mm
	MBL	5490kN
シンカーの水中重量	581kN	
下部チェーン上端のブイの浮力	153kN	

## 試設計結果

設計	概形	索構成
(A)	<p>複合係留 (チェーン+ロープ+ブイ・シンカー)</p> <p>風・波・流れの方向</p> <p>チェーン径81mm 長270m      ロープ径167mm 長300m      チェーン(25m)</p> <p>水深64m</p> <p>アンカー点距離632m</p>	<p>索本数：9本</p> <p>上部チェーン                      MBL：5490kN</p> <p>ロープ(ナイロン)                MBL：5472kN</p> <p>下部チェーン                      MBL：5490kN</p> <p>シンカー水中重量                581kN</p> <p>下部チェーン 上端ブイ浮力                      153kN</p>
(B)	<p>カタナリー係留 (チェーン+ロープ)</p> <p>風・波・流れの方向</p> <p>チェーン径81mm 長50m</p> <p>ロープ径167mm 長480m</p> <p>チェーン径81mm 長100m</p> <p>水深200m</p> <p>アンカー点距離1196m</p>	<p>索本数：6本</p> <p>上部チェーン                      MBL：5490kN</p> <p>ロープ (ナイロン)                MBL：5472kN</p> <p>下部チェーン                      MBL：5490kN</p>
(C)	<p>カタナリー係留 (チェーン)</p> <p>風・波・流れの方向</p> <p>チェーン径81mm 長1235m</p> <p>水深200m</p> <p>アンカー点距離1196m</p>	<p>索本数：6本</p> <p>チェーン                              MBL：5490kN</p>

## ① 風・波・流れの入射方向の組み合わせについて

- 風・波・流れの入射方向がすべて同一方向：Co-directional条件
- 風・波・流れの入射方向がすべて異なる、一部異なる：Misaligned条件

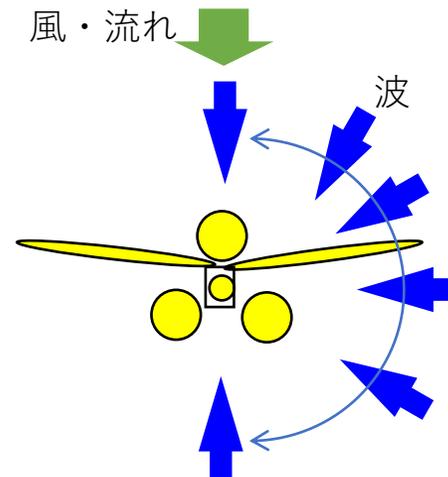
張力への影響

	風	波
張力の定常成分	大	小
張力の変動成分	小	大

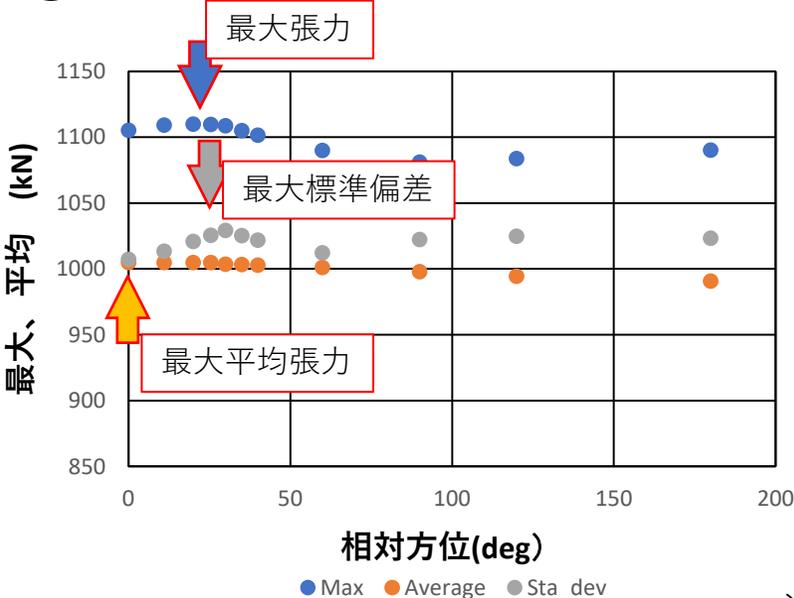


風による定常成分が最大となる風向と、波による変動成分が最大となる波向が同一とは限らない

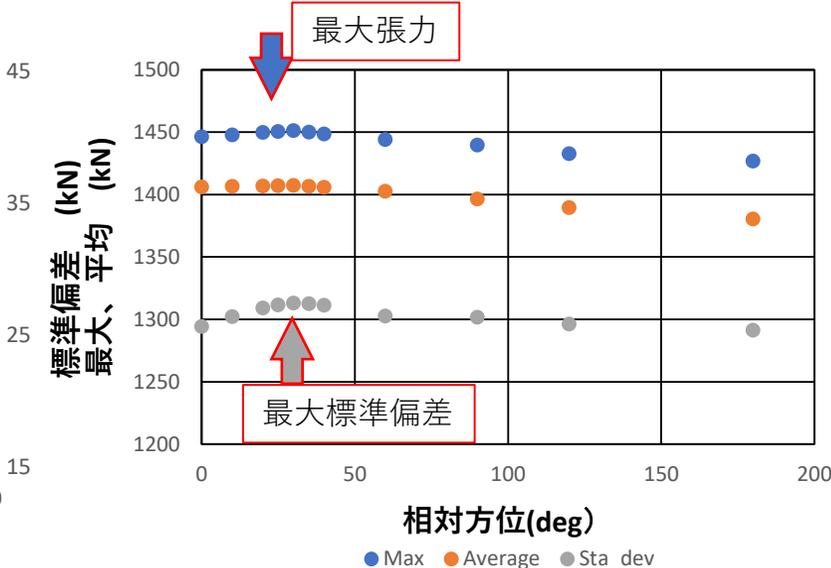
- 風・波・流れの入射方向の組み合わせを変えた計算を実施。



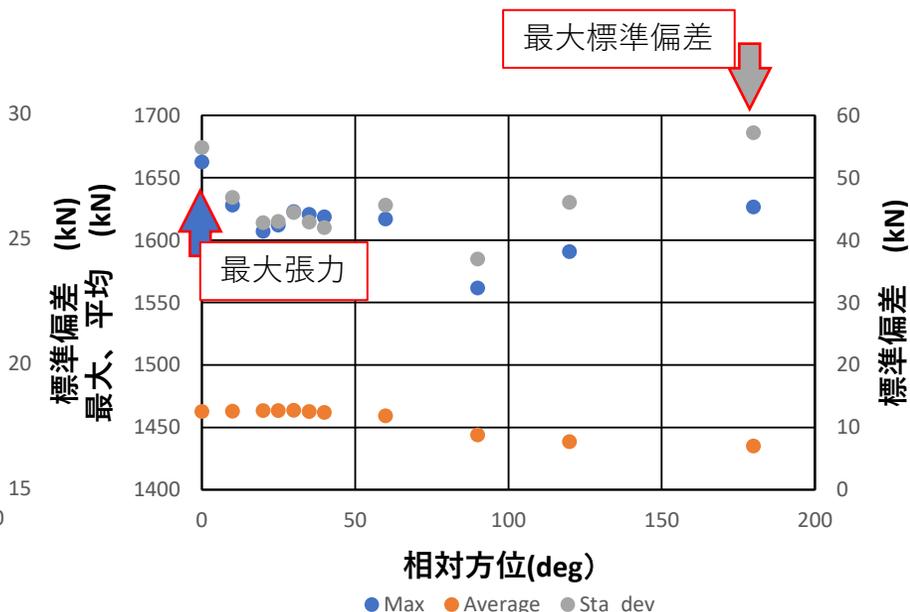
## ① 風・波・流れの入射方向の組み合わせについて



(A)複合係留



(B)チェーン+ロープのカテナリー係留



(C)チェーンのカテナリー係留

波向を変えた場合の張力の最大値・平均値・標準偏差

最大張力と張力標準偏差の最大値が発生した波向条件

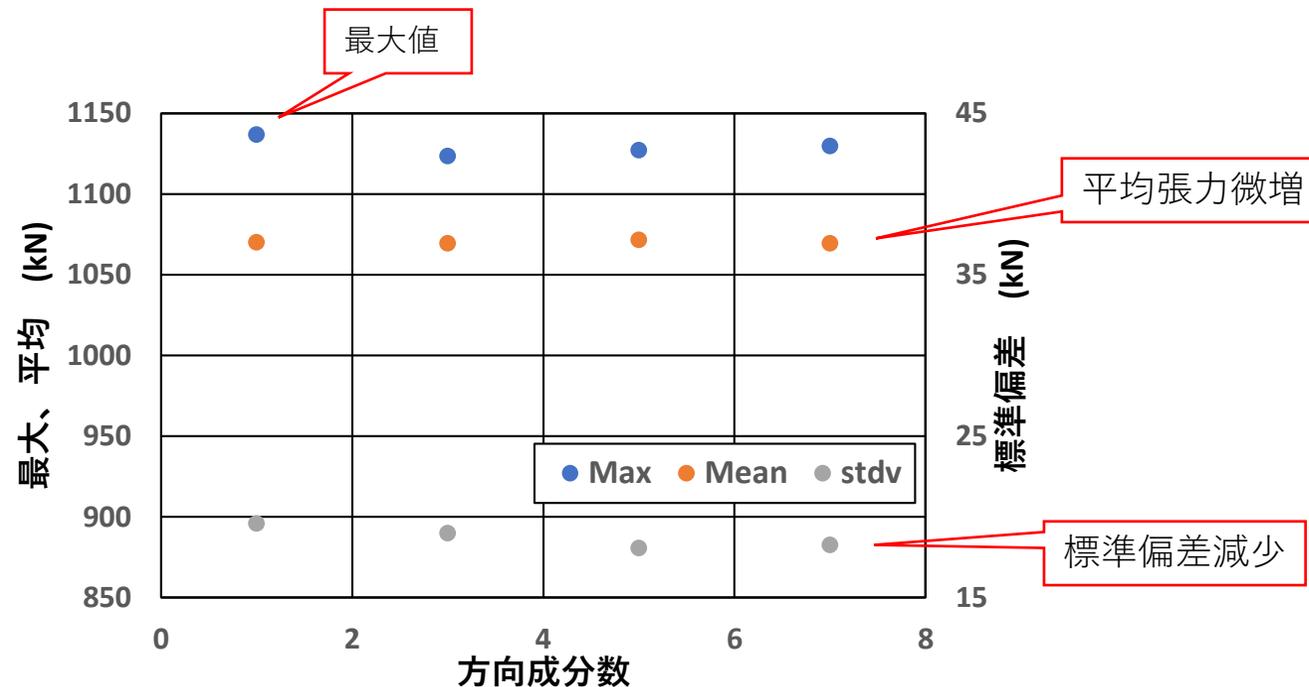
係留方式	最大張力	標準偏差最大値
(A)複合係留	20度	30度
(B)カテナリー係留 (チェーン・ロープ)	20度	30度
(C)カテナリー係留 (チェーン)	0度	180度

### 留意点①

Co-directional条件で張力最大になるとは限らず、Misaligned条件で張力最大となる可能性あり。時系列シリーズ計算実施前に確認する必要。

## ② 波の方向分布の影響について

- 通常の海洋構造物では一方向波による解析は安全側（時系列中最大張力が大きくなる）となる。
- 係留張力に対する波の方向分布の影響を確認するため、方向分布の成分数を1,3,5,7と変えて計算を実施（方向成分数1は1方向波）。



### 留意点②

特殊な係留系等では方向分布の影響も否定できないため、影響を確認することを推奨。

## ③ 最大張力が発生する海象条件について

- スラスト荷重は定格風速付近で最大となる。
- 波による変動張力は、波高が大きくまた周期が短い条件で大きくなる。
- どのような組み合わせで最大張力となるか、赤枠の条件で解析を実施。

平均風速－有義波高結合頻度表（単位：‰）

		有義波高(m)										
		0.375	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25	6.25	7.25	8.25	9.25	10.25
平均風速 (m/s)	2.5	160.76	117.84	5.2702	0.1923	0.0087						
	6.25	94.146	233.99	26.786	0.6626	0.0446	0.0472	0.0028				
	8.75	7.4513	115.74	47.422	2.3184	0.1745	0.0356	0.003				
	11.25	1.3971	39.581	77.78	11.72	0.9521	0.1135	0.0115	0.0013			
	13.75	0.1254	2.1869	17.94	12.377	1.3647	0.1343	0.0443	0.0012			
	16.25	0.0276	0.4657	3.9588	8.1076	2.9091	0.5831	0.1984	0.0163	0.0075		
	18.75	0.004	0.0672	0.2137	0.8691	1.0259	0.3507	0.1834	0.0238	0.0122	0.0259	0.001
	21.25	0.0015	0.0175	0.0597	0.2185	0.4582	0.379	0.2543	0.1541	0.0751	0.0296	0.0222
	23.75		0.0016	0.0064	0.0194	0.056	0.0797	0.0559	0.0606	0.0378	0.0385	0.0315
	26.25			0.0017	0.006	0.0139	0.0407	0.0442	0.0147	0.0246	0.0102	0.0132
	28.75						0.0061	0.0311	0.0083	0.0033	0.0018	0.0023
31.25						0.0021	0.0115	0.0294				

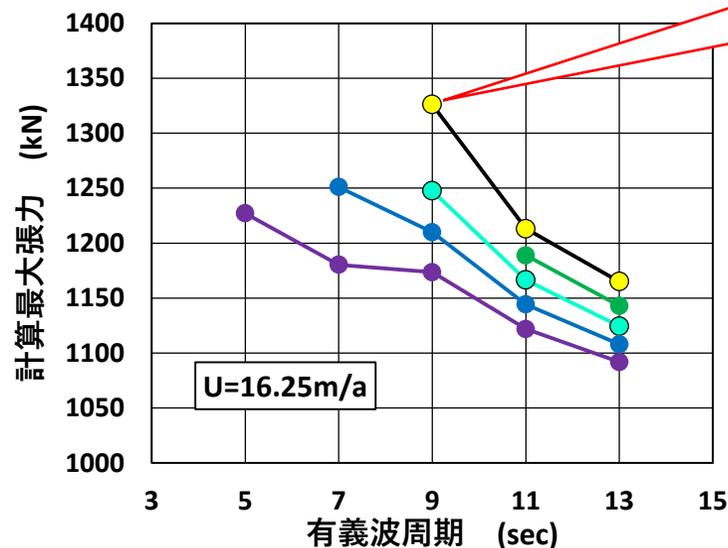
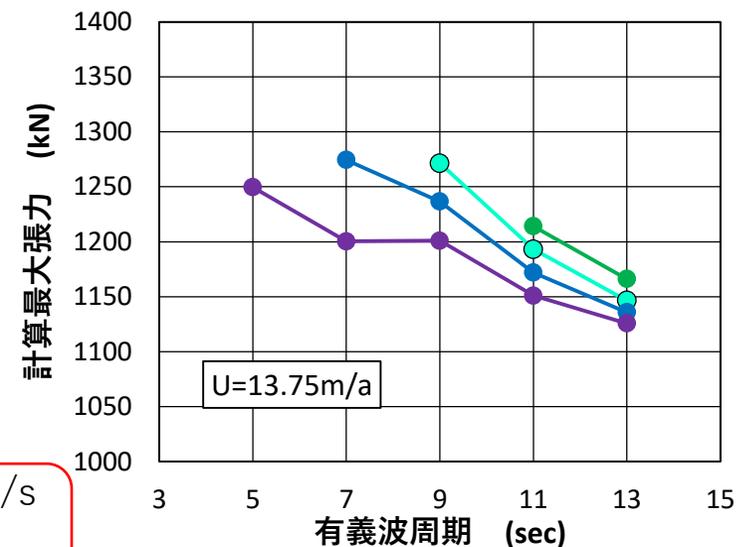
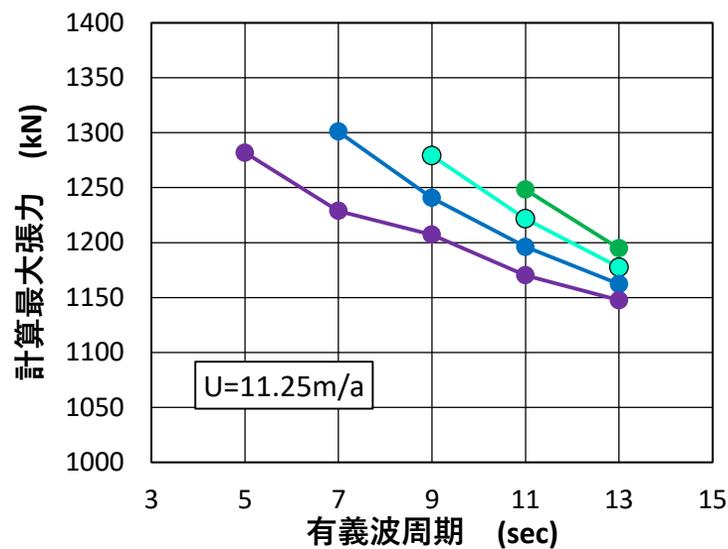
← 定格風速

← 暴風待機時

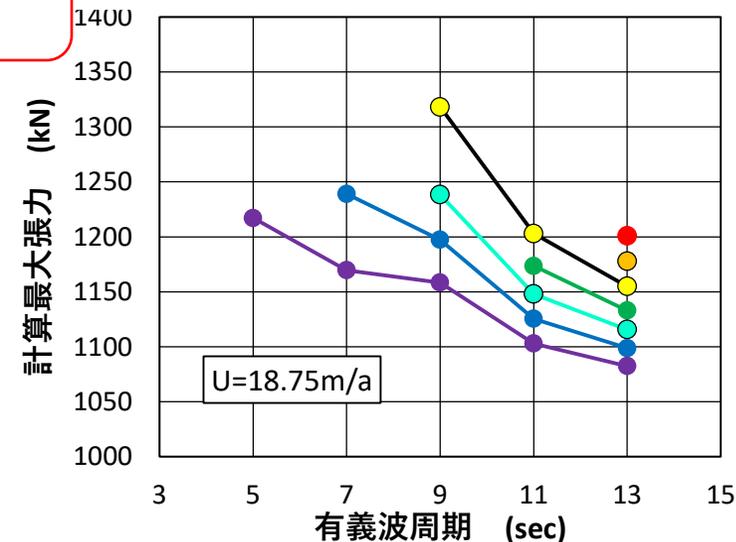
有義波高－有義波周期結合頻度表（単位：‰）

		有義波高(m)										
		0.375	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25	6.25	7.25	8.25	9.25	10.25
有義波周期 (s)	1	0.1936										
	3	124.2	38.002									
	5	72.603	299.62	36.28	0.4513	0.1012						
	7	57.244	143.22	131.35	21.376	0.7877	0.0619					
	9	7.3376	21.547	8.2699	13.555	5.5328	0.6647	0.1017		0.0064		
	11	2.0262	5.6556	2.4043	0.6467	0.3777	0.9271	0.6347	0.1756	0.0452		
	13	0.196	1.4435	0.7299	0.1756	0.1446	0.0935	0.0764	0.1047	0.1087	0.0923	0.0242

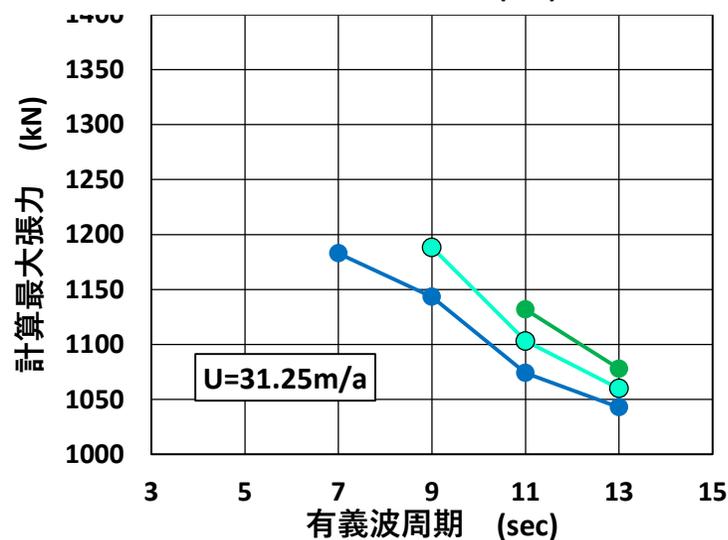
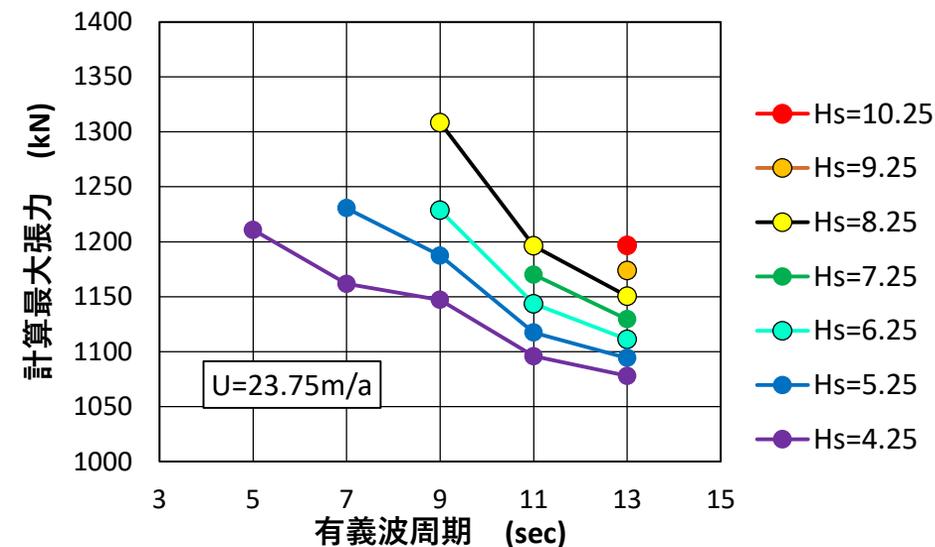
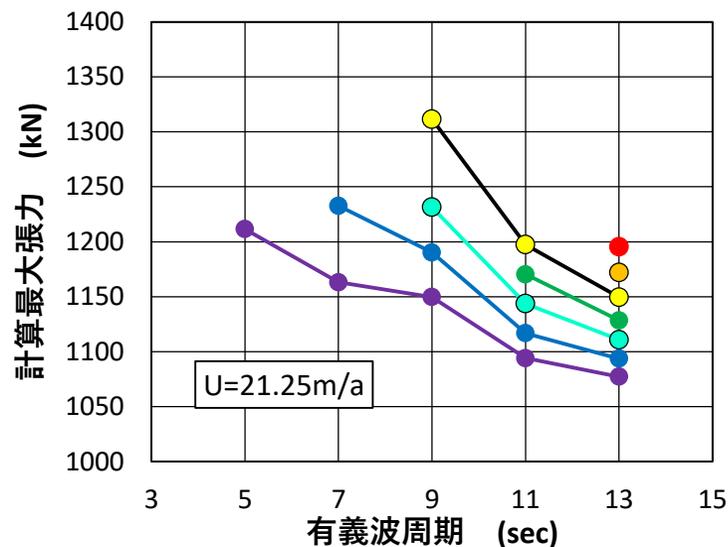
## ③ 最大張力が発生する海象条件について



最大張力発生  
 風速 16.25m/s  
 有義波高 8.25m  
 有義波周期 9.0s



## ③ 最大張力が発生する海象条件について



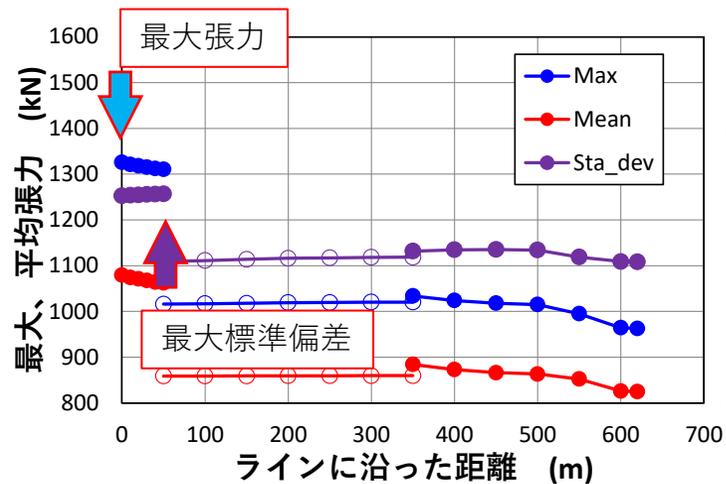
- (A)複合係留では、最大張力に対する波周期特性は、ほぼ全ての風速・波高において、単純減少傾向。
- 波周期に対する張力特性が判ると、張力が最大となる波周期範囲をほぼ特定可能となる。

### 留意点③

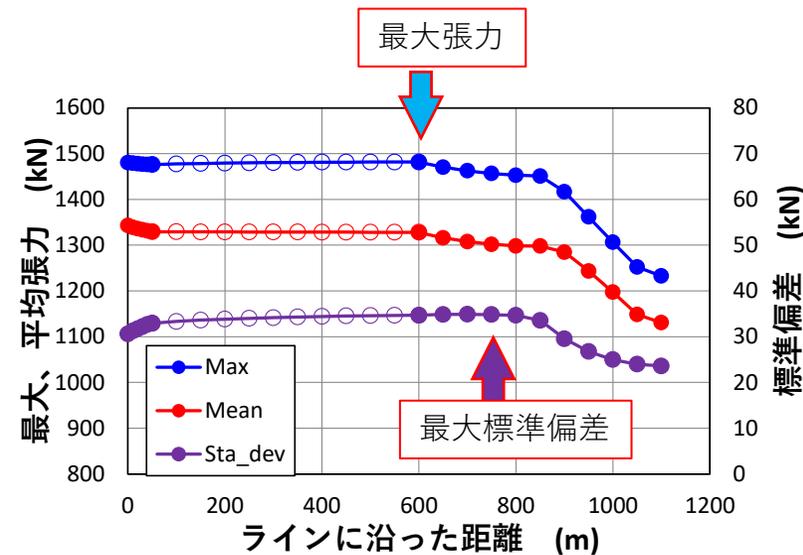
風速が定格に近く、波高が高く、波周期が短い条件で張力が最大となる。

## ④ 最大張力の発生箇所について

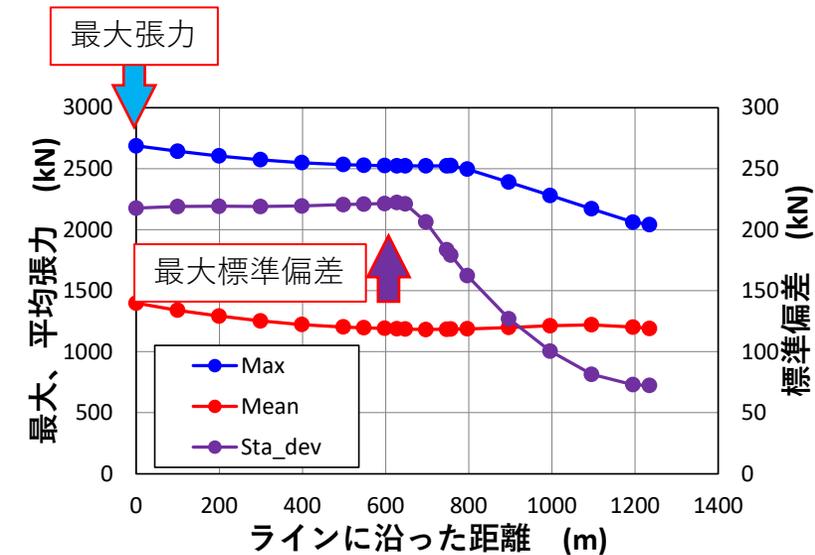
- (A)、(B)、(C)の3種類の係留系について、係留ラインに沿って最大張力、平均張力、標準偏差を算出した。



(A) 複合係留



(B) チェーン+ロープのカテナリー係留



(C) チェーンのカテナリー係留

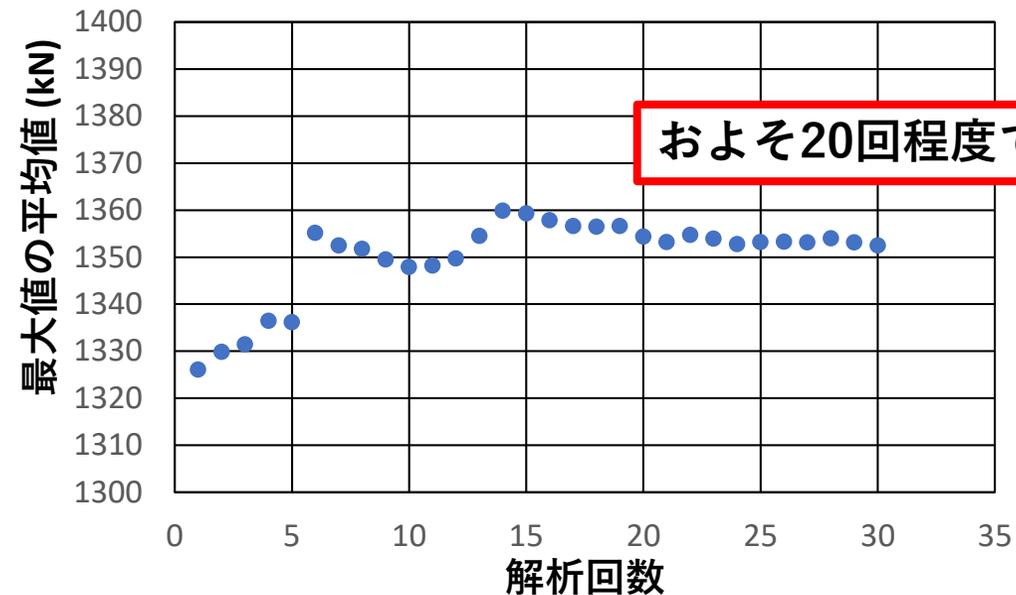
- 最大張力：チェーンでは上端で、ロープでは下端で最大張力が発生。
- 平均張力：上端から下端に向けて減少する。
- 標準偏差：上端から下端に向けて増加し、海底着底点近傍で減少に転じる。
- 複合係留では、シンカーの影響で張力分布に不連続が生じる。ロープと下部チェーンの不連続（ブイの影響）はシンカーの影響より小さい。

### 留意点④

最大張力は海底着底点の近傍の場合もあるため確認が必要。

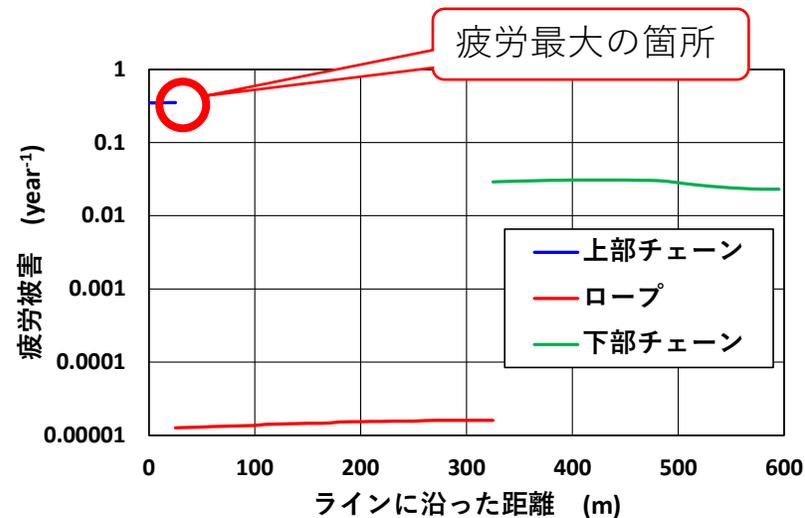
## ⑤ 最大張力推定のための解析回数について

- 時間領域解析による最大張力の推定値は、複数回の解析から得られる時系列データにおける、各最大張力の平均値とするのが一般的。
- DNVでは1回のシミュレーション時間を3時間、乱数を変えて10～20回のシミュレーションを行うことを推奨。
- 張力最大条件（風速、波高、波周期、波・風の相対方位）における不規則波、乱流風の位相を変えて3時間シミュレーションを複数回実施した。

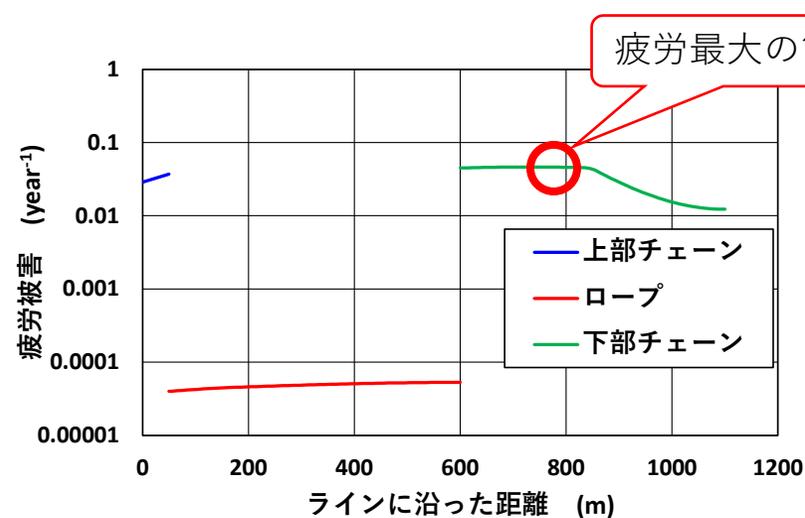


## ⑥ 最大疲労被害度の発生箇所について

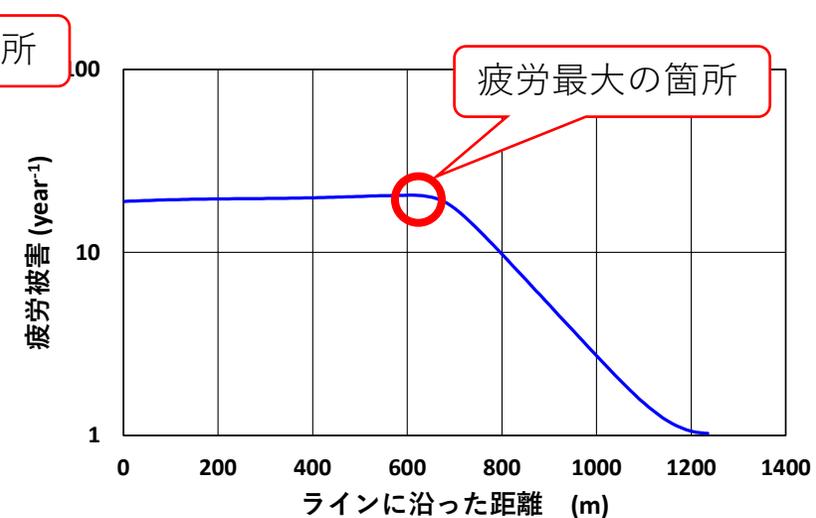
- (A)、(B)、(C)の3種類の係留系について、係留ラインに沿って疲労被害度を算出した。



(A)複合係留  
風速 11.25m/s



(B)チェーン+ロープのカテナリー係留  
風速 18.75m/s



(C)チェーンのカテナリー係留  
風速 18.75m/s

- 疲労被害は張力の標準偏差と密接に関連する。
- 標準偏差は浮体側からアンカーに向けて増加し、海底着底点近傍で減少に転じる。
- 複合係留の場合、ブイ・シンカーの影響で疲労の増加の傾きが変わり、T-N曲線の違いにより疲労被害分布に不連続が生じる。

**留意点⑥**  
最大張力発生箇所と疲労最大箇所が一致しない場合がある。

- 係留系に関連するコストの削減に有効と考えられる、合成繊維索を用いた係留系について様々な検討を実施、以下の成果を得た。
  - 軸剛性の非線形性は、4直線程度の近似が望ましい。
  - 係留系を評価する上での留意点を提示した。
    - ① 風・波・流れの入射方向の組み合わせについて
    - ② 波の方向分布の影響について
    - ③ 最大張力となる海象条件について
    - ④ 最大張力の発生箇所について
    - ⑤ 最大張力推定のための解析回数について
    - ⑥ 最大疲労被害度の発生箇所について
- これらの成果は、「浮体式洋上風力発電施設基準安全ガイドライン」の改訂として反映される予定。
- 今回の検討は、国土交通省海事局の請負研究として実施された。関係各位に深く感謝いたします。