

令和2年(第20回)海上技術安全研究所研究発表会

合成繊維索の安全ガイドライン化に係る検討

産業システム系
穴井 陽祐

構造安全評価系
安藤 孝弘

産業システム系
津村 秀一

海洋開発系
前田 克弥

海洋先端技術系
中條 俊樹

東京製綱繊維ロープ株式会社
徳永 祐二、畑 和宏



本日の内容

- 背景と目的
- 疲労試験方法の検討
- 疲労試験の実施と試験結果
- ガイドライン化の方向性と今後の課題

背景と目的（1）

- 浮体式洋上風力発電施設（FOWT：Floating Offshore Wind Turbines）の商用化拡大には 建造・設置・維持管理コストの低減が重要。
- 国内のFOWTの設置は、浅い海域（大陸棚など）が有力。→ 係留方法が課題。

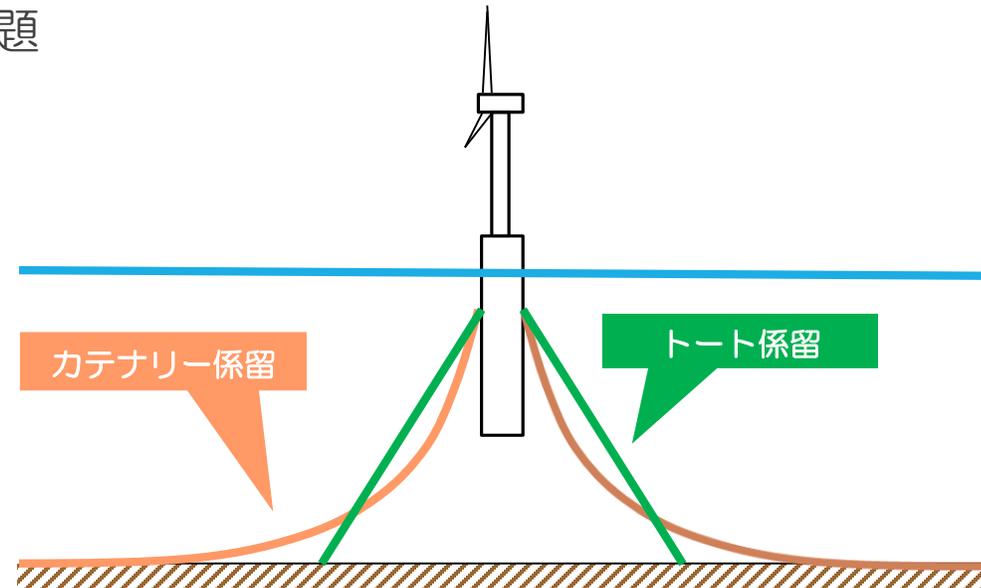
■ 係留の例と浅い海域での課題

カテナリー係留

- ライン（チェーン）の自重を利用。
- 展開面積が大。
- 国内FOWTはこれが中心。

浅い海域では

- ✓ 十分な係留力を得るために重量や中間シンカー等の工夫が必要。



トート係留

- ライン（合成繊維索・鋼製ワイヤー）の伸びを利用。
- 展開面積が比較的小。

浅い海域では

- ✓ ラインが短くなるため必要な伸びを得難くなる。
- ✓ より伸びの大きい素材のラインが望まれている。

合成繊維索を用いた
トート係留

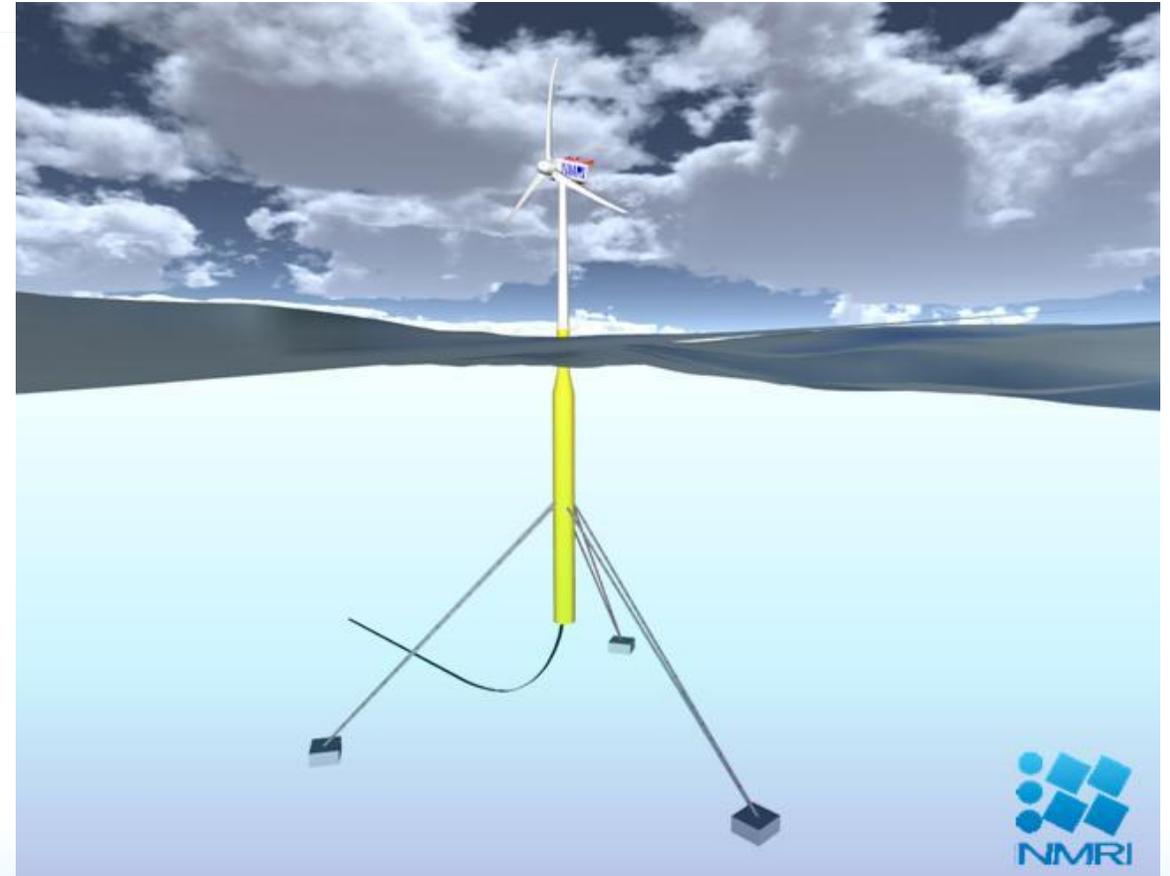
- ✓ 重量軽減 → 施工性の向上
- ✓ 展開面積小 → 漁業等との共存

背景と目的（2）

- 浮体式洋上風力発電技術基準、同安全ガイドラインでは、合成繊維索による係留も考慮されているが、技術的な情報が不足。



- 技術的検討に基づくガイドラインの策定。
- コスト低減に向け、係留への合成繊維索の適用を選択肢の一つに。
 - ✓ 合成繊維索を用いた係留系の一体解析による安全性評価手法
 - ✓ **合成繊維索の疲労強度**
 - ✓ 合成繊維索の生物付着影響、等



背景と目的 (3)

- 合成繊維索を用いた係留は、ポリエステル製ロープが使用実績が多いが、水深の大きい場合に用いられている。
- 浅海域の場合はポリエステルよりも伸びが大きいナイロン製ロープのほうが設計上の自由度が大きくなるため、適用が期待されている。

課題

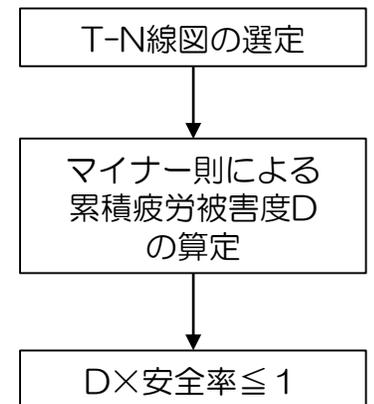
- ナイロン製ロープの適用に関する知見が乏しい。
- FOWTは20年間の使用が一般的な設計条件。疲労強度も重要因子。
 - 実機で用いられる合成繊維索の疲労試験に適切な設備が国内に無く、コスト増加の一因に。



- 比較的小規模な疲労試験方法およびその妥当性を検討。
- ポリエステル製ロープと比較することで実機適用時における懸念点や留意点を洗い出し。



技術基準における係留の疲労強度評価の流れ

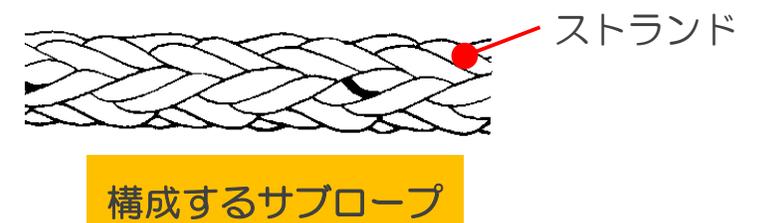
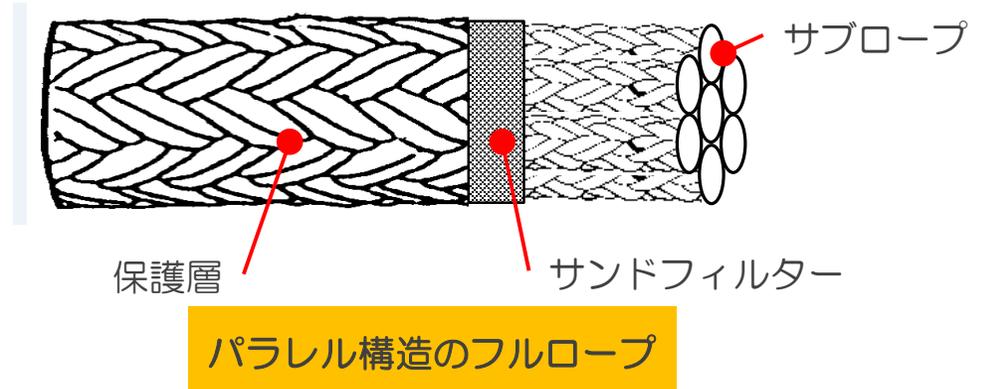


疲労試験方法の検討

- ナイロン製ロープをFOWT係留として実運用中の企業を含む関連企業、団体へのヒアリング調査。
 - ✓ 検討対象は、平行構造のフルロープ。
 - ✓ この場合、フルロープの疲労強度は構成するサブロープの疲労強度で評価可能。

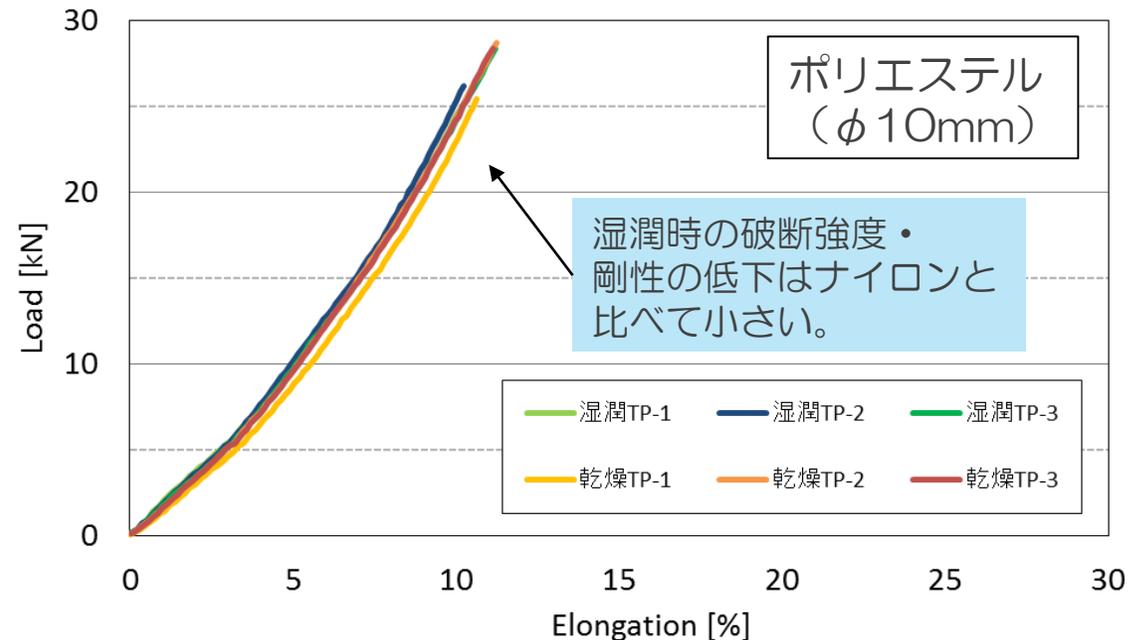
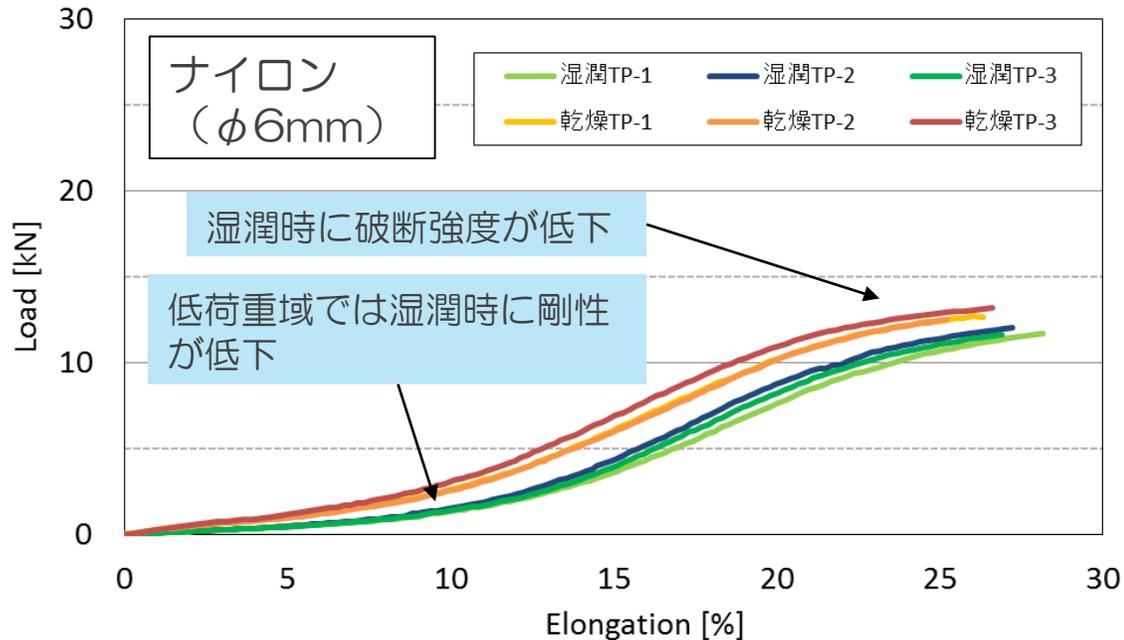


- サブロープによる疲労試験を行い、疲労特性データを蓄積。
- 一般的にナイロンはポリエステルに比べて耐水性が劣るため、より実運用に即した人工海水中での試験を実施。



引張破断試験

- 乾燥状態と湿潤状態において、引張破断試験を実施。
- 湿潤状態の破断強度をもとに、最小破断強度（MBS）を設定。



ナイロン製ロープ
MBS : 10.2 [kN]

ポリエステル製ロープ
MBS : 23.5 [kN]

検討項目と疲労試験条件

- 材 料：ナイロンおよびポリエステル
- 乾 湿：大気中および人工海水中
- 初期張力：常に張力が作用する場合と、
最小荷重時に張力がゼロになる場合

ナイロン

乾湿	最小荷重 [%MBS]	最大荷重 [%MBS]
湿潤	2	22, 35, 42, 52, 62, 82
	0	33, 40, 50, 60
乾燥	2	35, 52, 62, 82

ポリエステル

乾湿	最小荷重 [%MBS]	最大荷重 [%MBS]
湿潤	2	62, 72, 82
	0	60, 70, 80

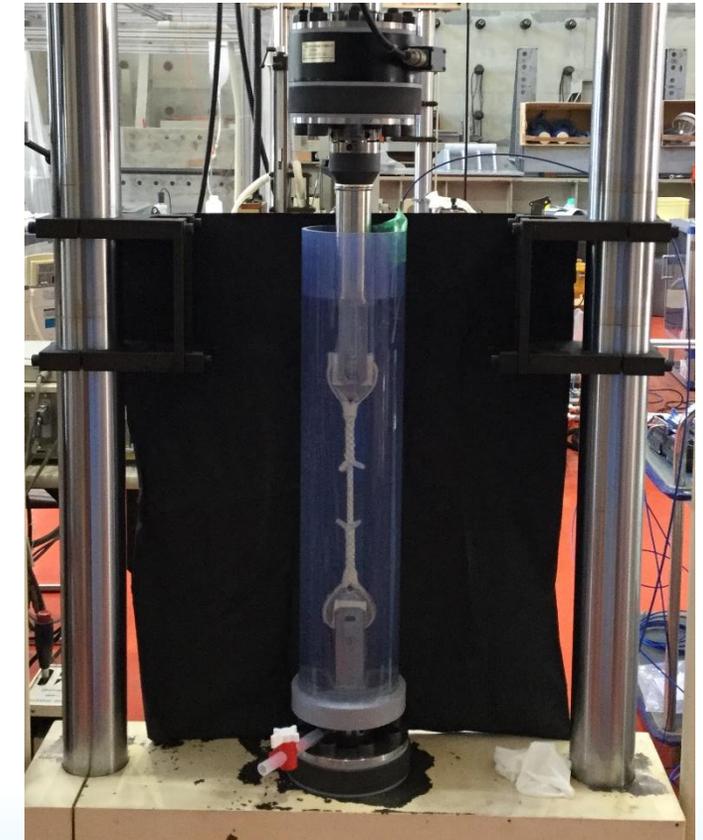
载荷周波数：0.1Hz

ロープ材質	ロープ径[mm]	ロープ長[mm]※
ナイロン PA6	φ6	300
ポリエステル PET	φ10	500

※ねらい寸法、シンプル穴中心間の長さ



サブロープ構造
12打ちロープ
(2×6構造)



試験中の様子
(湿潤時)

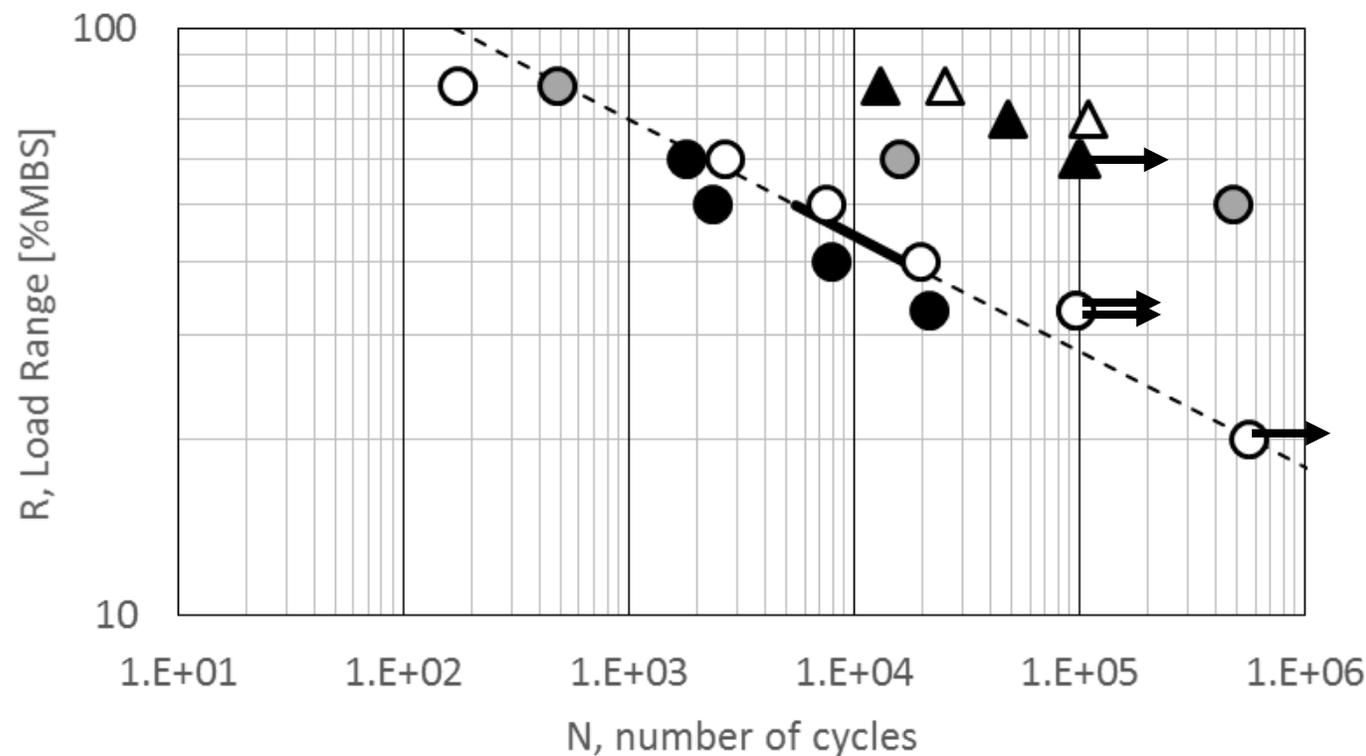
疲労試験結果

- 繰返し荷重範囲（ここではMBSとの比）と疲労破断時の繰返し数の関係。
- 矢印付きの記号はその繰返し数における未破断のデータ。
- 試験部位以外の場所から疲労破断した結果は除く。

○：ナイロン, 初期張力あり, 湿潤
 ●：ナイロン, 初期張力なし, 湿潤
 ◐：ナイロン, 初期張力あり, 乾燥

△：ポリエステル, 初期張力あり, 湿潤
 ▲：ポリエステル, 初期張力なし, 湿潤

【参考】
 実線：ISO18692-1に規定された
 最小繰返し数
 破線：上記最小繰返し数を外挿



ガイドライン化の方向性と今後の課題（1）

- ナイロン製サブロープ（湿潤、初期張力あり）は、ISO規格における係留の疲労設計用T-N線図とおおよそ同等の結果（ $\Delta 80\%MBS$ 除く）。
- $\Delta 80\%MBS$ は、疲労試験後の目視観察にて摩耗状況等が他の条件と異なっていた。

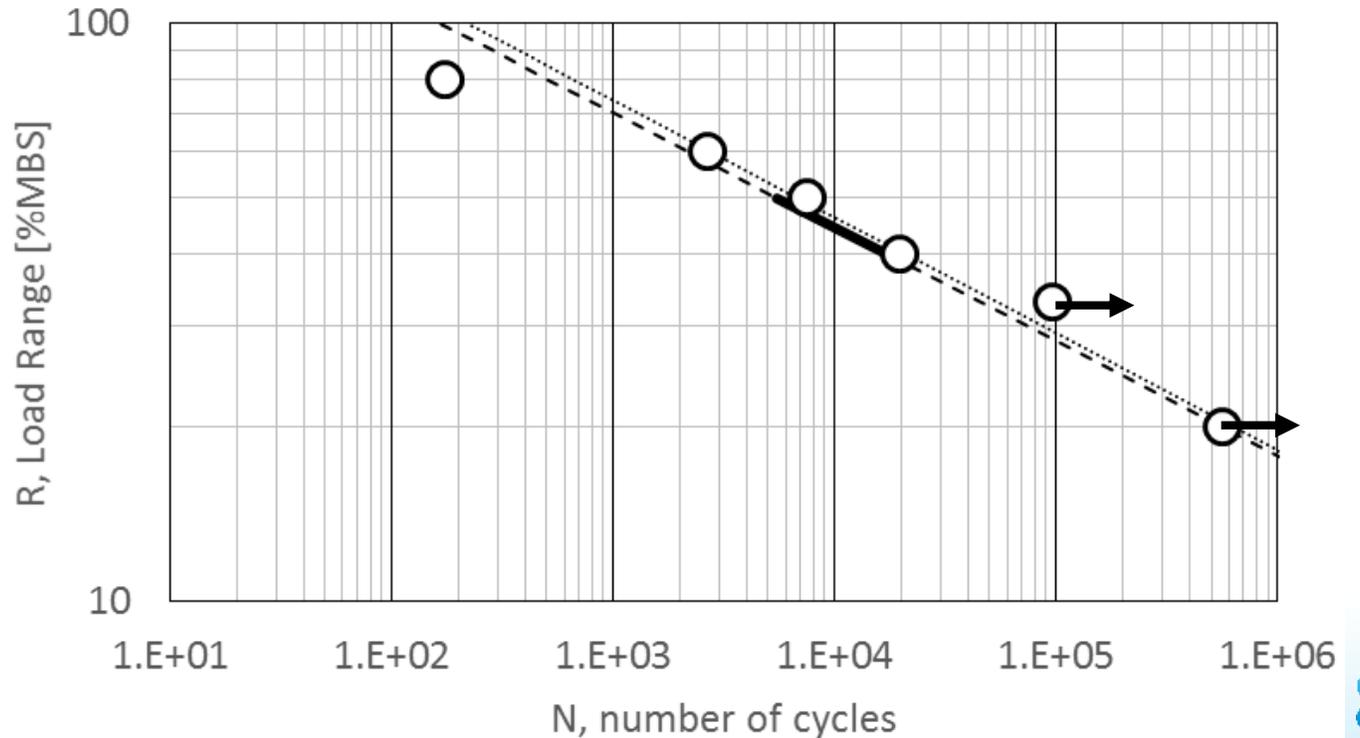
○：ナイロン、初期張力あり、湿潤

実線：ISO18692-1に規定された
最小繰返し数

破線：上記最小繰返し数を外挿

ロープ材料がアラミドやナイロン等であって、試験結果が十分にそろっていない場合、
・ロープ耐久試験（ISO18692-1）
・係留の疲労設計（ISO19901-7）
で同じT-N線図（※）を使用可能とされる。

※ただし、ISO19901-7においては平均張力とMBSの比Qが0.3のときの線図。



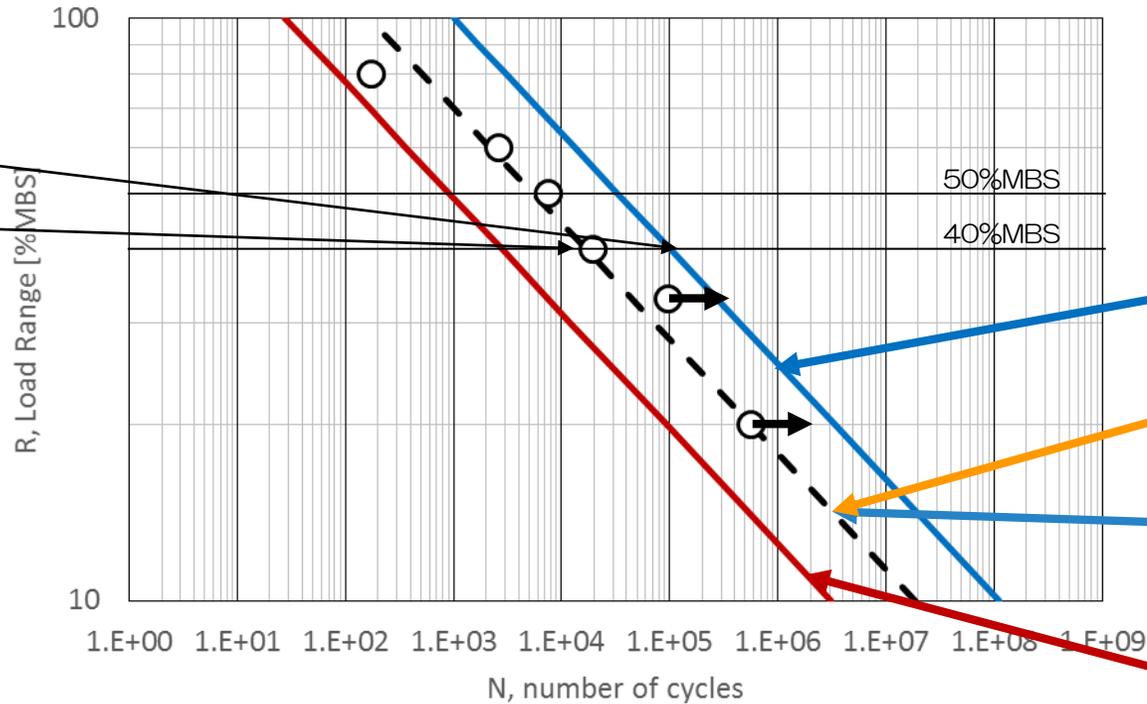
ガイドライン化の方向性と今後の課題（2）

- ロープに求める耐久性能に関し、ナイロンもポリエステルと同様の取扱いとしていくことが考えられる。

ポリエステルの係留設計線で
マイナー則により疲労被害度を
計算（R=40%MBS）した場合

疲労被害度：1（破断）
とすると

疲労被害度：約0.17



※ISOに規定されたT-N線図
※ここでは、規定外の範囲も外挿して描画

ポリエステルの係留設計用
（ただし Δ 50%MBSを超えない範囲）

ナイロンの係留設計用

ポリエステルのロープ耐久性能
この最小繰返し数後の残存強度
が80%MBSを下回らないこと

ナイロンのロープ耐久性能
（イメージ）

まとめ

合成繊維索を用いたFOWT係留系のガイドライン化に向けて、使用実績が少ないナイロンを中心としつつ、合成繊維索の疲労強度評価に関する検討を行った。

- ナイロン製ロープを使用する際の留意点を洗い出すため、疲労強度に影響を及ぼす因子について検討した。
- 合成繊維索のT-N線図の妥当性確認および疲労試験の小規模化に向け有用な知見を得た。

- 疲労強度設計のためには、今後も引き続きデータの蓄積を行い、現行の安全率の妥当性についても検討する必要がある。
- ナイロン製ロープについて、今後ポリエステル製ロープと同等の取り扱いをするためには、ナイロン製ロープの製品に求める耐久性能についても検討する必要がある。