

令和4年度採択  
成長型中小企業等研究開発支援事業

「海底・地中電力ケーブル牽引用の低摩耗型  
複合スーパー繊維ロープの開発」

研究開発成果等報告書

令和7年5月

担当局 四国経済産業局  
補助事業者 公益財団法人かがわ産業支援財団  
間接補助事業者 高木綱業株式会社・香川県産業技術センター

## 目 次

### 第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 ……1
- 1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者) ……2
- 1-3 成果概要 ……5
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口 ……5

### 第2章 本論

- 2-1 本事業の全体概要説明 ……5
- 2-2 実施内容
  - 【1】摩耗低減技術の開発 ……6
  - 【2】摩擦制御技術の開発 ……20
  - 【3】取扱基準の設定 ……23

### 最終章 全体総括

- 3-1 アドバイザーによる講評 ……28
- 3-2 3年度の研究開発成果 ……30
- 3-3 研究開発後の課題 ……30
- 3-4 事業化展開 ……31



# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### (1) 研究開発の背景

我が国では、洋上風力発電等の再生可能エネルギー開発計画及び電力系統増強計画が推進されている。送配電会社においては老朽化した地中送電設備の更新が鋭意進められており、これに伴って大規模な電力ケーブル敷設工事が必要となっている(図1)。

電力ケーブル敷設工事は、主に鉄製のワイヤーロープを用いて電力ケーブルを牽引するが、重く硬いため施工性が悪く、さらにワイヤーロープを通す管路等の接触物を摩擦・損傷させる。このため、施工会社から「ワイヤーロープの代替として、同等の強度があり、軽く施工性に優れた繊維ロープを早急に導入したい」との強い要望がある。

しかし、繊維ロープは、牽引用途としての製品の歴史が浅く取扱基準が定まっていないことから、試験的な採用に留まっているのが現状である。一方、主たる研究開発等実施機関の高木綱業株式会社(以下、高木綱業という)は、近年の研究開発を通じて強度を更に向上したスーパー繊維を用いたスーパー繊維ロープが「ワイヤーロープを遥かに超える耐疲労性能を有すること」、そして「摩擦がスーパー繊維ロープの課題であること」を見出した。

そこで、高木綱業は、これまでに蓄積したスーパー繊維ロープの耐疲労性向上技術をベースに、更なる摩擦低減と摩擦制御のコア技術を開発し、ワイヤーロープの代替となる牽引用の“低摩擦型複合スーパー繊維ロープ”を開発する(図2)。

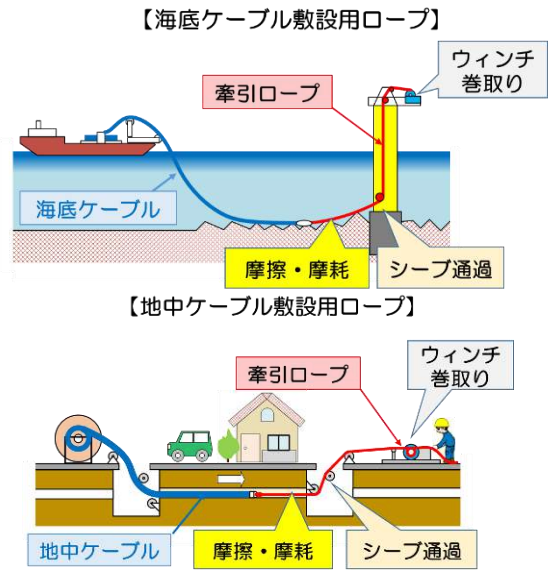


図1 電力ケーブル敷設工事

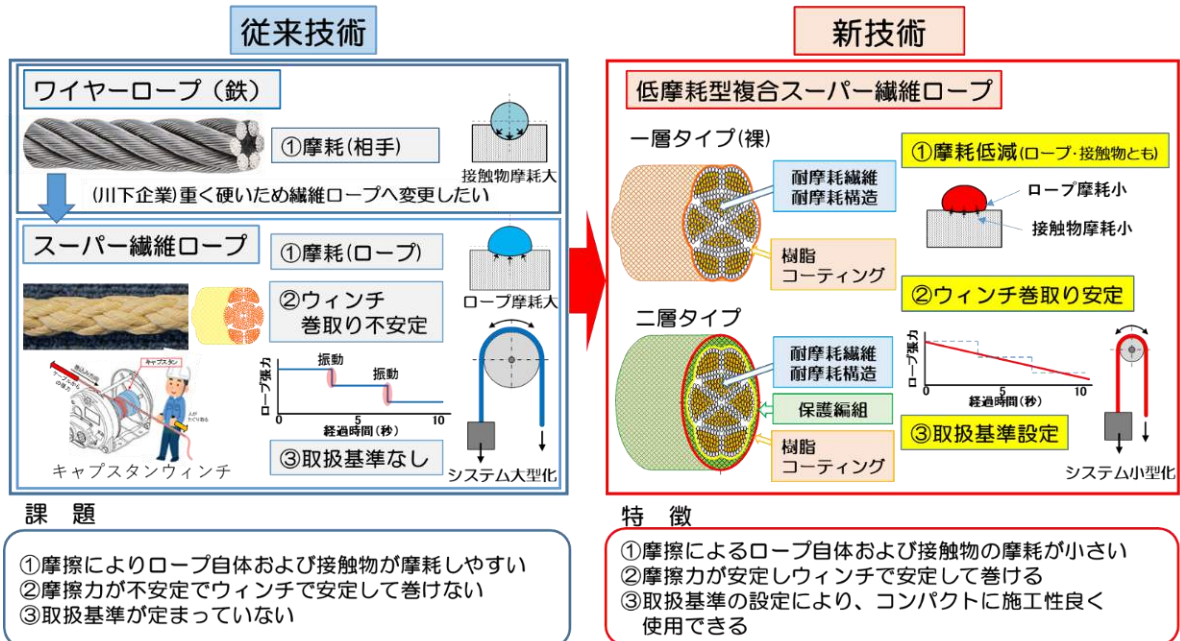


図2 従来技術と新技術

## (2) 研究目的及び目標

高木綱業は、川下企業の抱える課題及び要請から、動索用ワイヤーロープに代わる低摩耗型複合スーパー繊維ロープの開発を目的とした。新技術開発のために必要な解決すべき課題は、次の3点とし、高度化目標を定めて開発に取り組んだ(表1)。

表1 研究開発の項目と高度化目標

項目	高度化目標
【1】摩耗低減技術の開発	従来のスーパー繊維ロープに対してロープ本体の摩耗 50%低減かつ、ワイヤーロープに対して接触物の摩耗 1/5
【2】摩擦制御技術の開発	ウィンチ巻取り時のスティックスリップ振動なし
【3】取扱基準の設定	安全率 SF=ワイヤーロープと同等 シーブ径比率 D/d=ワイヤーロープの 3/4

## 1-2 研究体制

### (1) 実施体制

当該研究開発は、次の共同体で研究開発を実施した(図3)。

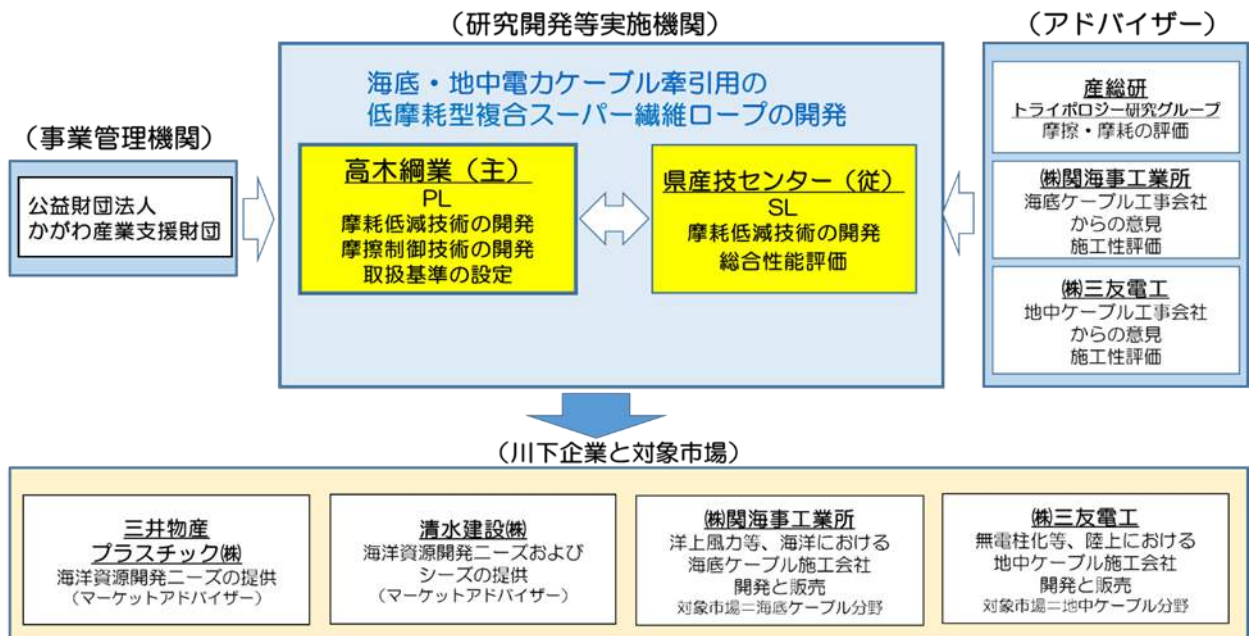


図3 研究開発の実施体制

## (2) 管理員及び研究員

### 【補助事業者】管理員

公益財団法人かがわ産業支援財団

氏名	所属・役職	実施内容
窪田 健康	技術振興部 参与(兼)部長	プロジェクト管理および委員会の開催
的場 勇樹	技術振興部 産学官連携推進課 課長代理 (事業開始～R6年3月31日)	
佐藤 恵子	技術振興部 研究開発支援課 専門員	

※異動のあった者のみ従事期間を記載。以下同様。

### 【間接補助事業者】研究員等

高木綱業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
高木 敏光	代表取締役社長(PL)	【1-1】【1-2】 【1-3】【1-4】 【2-1】【2-2】 【3-1】【3-2】 【3-3】
寺田 英城	取締役 繊維ロープ部長	
藤岡 茂正	繊維ロープ部 さぬき工場長	
二神 誉夫	技術品質管理室長 (事業開始～R5年9月30日)	
鎌倉 昌士	技術品質管理室 (R5年10月1日～事業終了)	
田中 優次	営業部 新プロダクト推進PJチーム	
矢野 哲夫	技術顧問	
森 利昭	新プロダクト推進チーム 上席研究員	

香川県産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
佐々原 浩幸	次長(SL) (R4年11月11日～R5年3月31日)	【1-1】【1-2】 【1-3】【1-4】 【3-3】
木村 功	次長(SL) (R5年4月1日～R6年3月31日)	
横田 耕三	次長(SL) (R6年4月1日～R7年3月31日)	
白川 寛	主席研究員	
藤本 啓資	技師	

### (3)外部の指導者・協力者

#### 【アドバイザー】

国立研究開発法人産業技術総合研究所 製造技術研究部門

氏名	所属・役職	協力内容
是永 敦	企画本部企画室 産業技術総括調査官 兼務) 製造技術研究部門 トライボロジー研究グループ 付	摩擦・摩耗の評価に関する技術指導
中野 美紀	トライボロジー研究グループ 主任研究員	
間野 大樹	トライボロジー研究グループ 主任研究員	

株式会社関海事工業所

氏名	所属・役職	協力内容
関 聡	海洋本部 海洋部 工事課	海底ケーブル施工者からの助言、施工性の評価

三友電工株式会社

氏名	所属・役職	協力内容
湊 勝己	統括本部長	地中ケーブル施工者からの助言、施工性の評価

三井物産プラスチック株式会社

氏名	所属・役職	協力内容
前田 晋吾	四国支店マネージャー	海洋資源開発のニーズの提供

清水建設株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
白枝 哲次	エンジニアリング事業本部 新エネルギーエンジニアリング事業部 事業部長	洋上風力建設事業者からのニーズ及びシーズの提供

### 1-3 成果概要

本研究開発では、計画どおり当初の目標を達成した(表2)。

表2 研究開発の実施項目と高度化目標達成状況

項目	目標達成状況
【1】摩耗低減技術の開発	従来のスーパー繊維ロープに対してロープ本体の摩耗 50%低減かつ、ワイヤーロープに対して接触物の摩耗 1/5 を確認した。 <b>目標達成</b>
【2】摩擦制御技術の開発	2種類の開発ロープを使用し、模擬試験を実施したところ、ウィンチ巻取り時のスティックスリップ振動がないことを確認することができた。 <b>目標達成</b>
【3】取扱基準の設定	開発した2種類のロープで、安全率 SF=ワイヤーロープと同等であることを確認した。 <b>目標達成</b>

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

高木綱業株式会社  
 営業部 新プロダクト推進PJチーム  
 田中 優次  
 TEL: 087-867-0271  
 メール:y.tanaka@t.2701.com

## 第2章 本論

### 2-1 本事業の全体概要説明

解決すべき課題を3つに定め、図4に示す流れで研究開発を進めた。

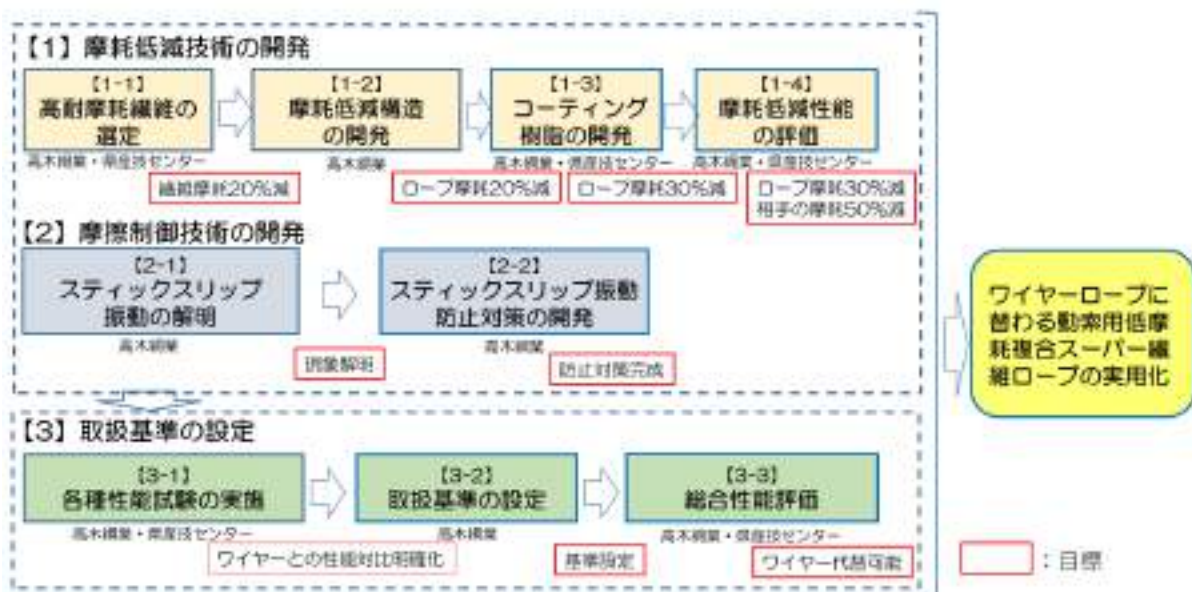


図4 研究開発の流れ

## 2-2 実施内容

### 【1】摩耗低減技術の開発

高木綱業は、県産技センターと共同で、耐摩耗性能の高い繊維を選定し、摩耗低減構造及びコーティング樹脂の開発により、ロープ自体の摩耗及び接触物の摩耗を低減する技術を開発した。

本研究開発では、「一層タイプ」「二層タイプ」2種類の低摩耗型複合スーパー繊維ロープを開発した。「一層タイプ」は、主に樹脂製管路等接触物が摩耗しやすい場合に用い、「二層タイプ」は主にコンクリート管路等ロープの方が摩耗しやすい場合に用いるなど、適切な使い分けが推奨できるように開発した。

### 【1-1】高耐摩耗繊維の選定(高木綱業, 県産技センター)

#### (1) 評価試験用繊維の選定

評価試験に用いるスーパー繊維として、3種類の系統の繊維(アラミド繊維:ケブラー、超高分子量ポリエチレン繊維:イザナス、ポリアリレート繊維:ベクトラン)から強度、太さなどの異なる繊維を選んだ(図5)。

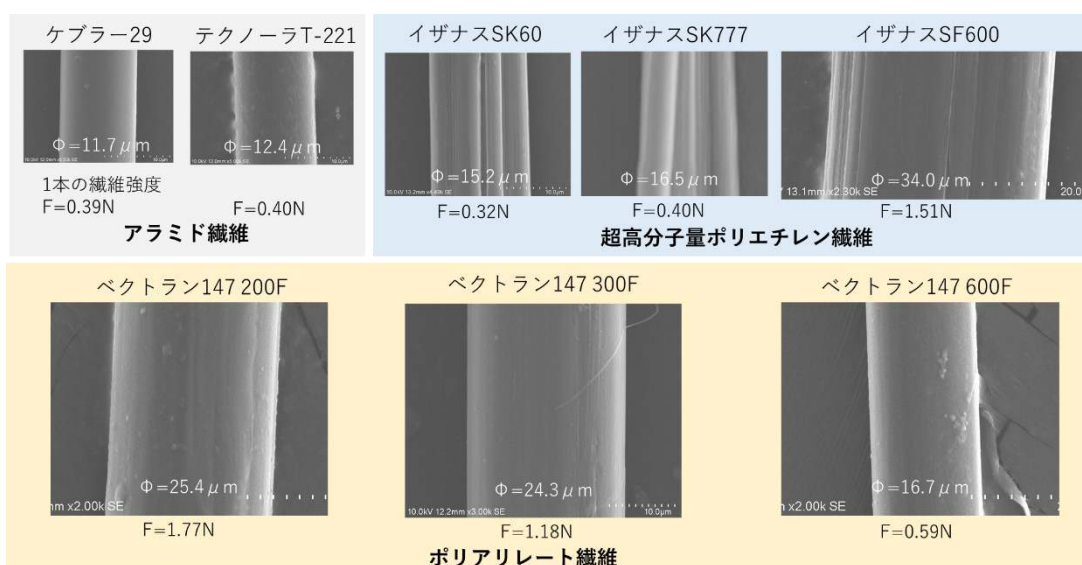


図5 評価試験用スーパー繊維のSEM観察結果

#### (2) 熱特性分析結果

ロープが摩擦対象と摩擦するときには摩擦熱で繊維の温度が上昇する。また、ロープが繰返し屈曲疲労を受ける時には繊維間摩擦により繊維の温度が上昇する。このため繊維温度の上昇が繊維の性能に与える影響を知ることが重要となる。県産技センターでは、温度上昇に対する繊維の性能を明らかにするために、2種類の熱分析装置を用いて代表候補繊維の熱特性を分析した。

##### ① 示差走査熱量計(DSC)分析結果

示差走査熱量計(以下 DSC)は、試料の熱的物性である軟化点や融点を測定する装置である。本装置を用いて代表候補繊維を分析した結果、超高分子量ポリエチレン繊維のイザナスは 140°Cを越えてから激しく変質し、繊維が収縮することがわかった。一方、ポリアリレート繊維のベクトランは 290°Cまで温度上昇しても変質せず極めて安定した性質を保つことがわかった(図6)。

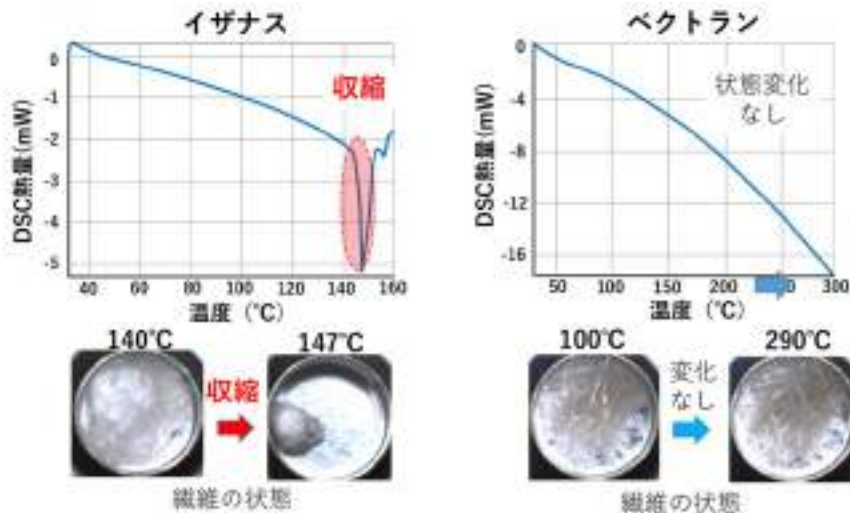


図6 DSC分析結果

## ②熱機械分析装置(TMA)分析結果

熱機械分析装置(以下、TMA)は、試料に一定の力をかけて温度を上昇させたときの寸法の変化を測定する装置であり、繊維の温度による軟化特性を知ることができる。

評価試験用候補繊維について分析した結果、イザナスは 60°C程度から伸びが徐々に増加するのに対し、一方のベクトランは、温度上昇による伸びが極めて小さく、230°Cを越えてから伸びが増大することが分かった(図7)。

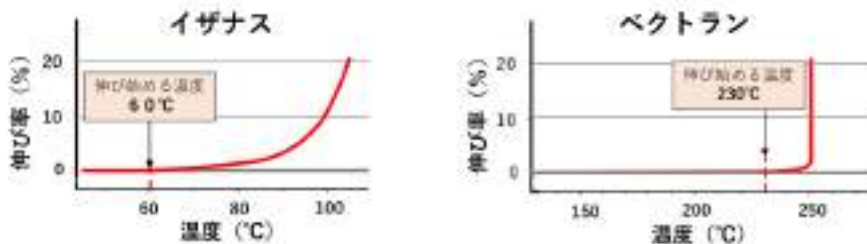


図7 TMA分析結果

以上2種類の分析により、イザナスは 60°C以上に繊維温度が上がる条件での使用は推奨できない。一方、ベクトラン 230°Cまで安定しており、摩擦など繊維温度が上昇する条件での使用に適している。

## (3)組紐(細いロープ)での耐磨耗性能試験

### ① 摩耗評価試験の実施

まずは、外径約6mm、引張強度 30~50kN の細いロープ(以下、組紐という)を用いて検討するため、供試繊維を撚り合わせて加工した(図8)。

試作した組紐は、摩耗試験装置を用いて鋼管、コンクリートブロックなどに対して 100 回往復摩耗させた後、新品の組紐に対する強度低下率を求め、耐磨耗性を評価した。代表的な例として、コンクリート山形ブロックとの摩耗試験の結果を示す(図9)。

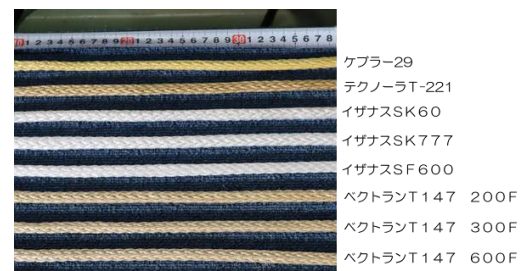


図8 試作した組紐

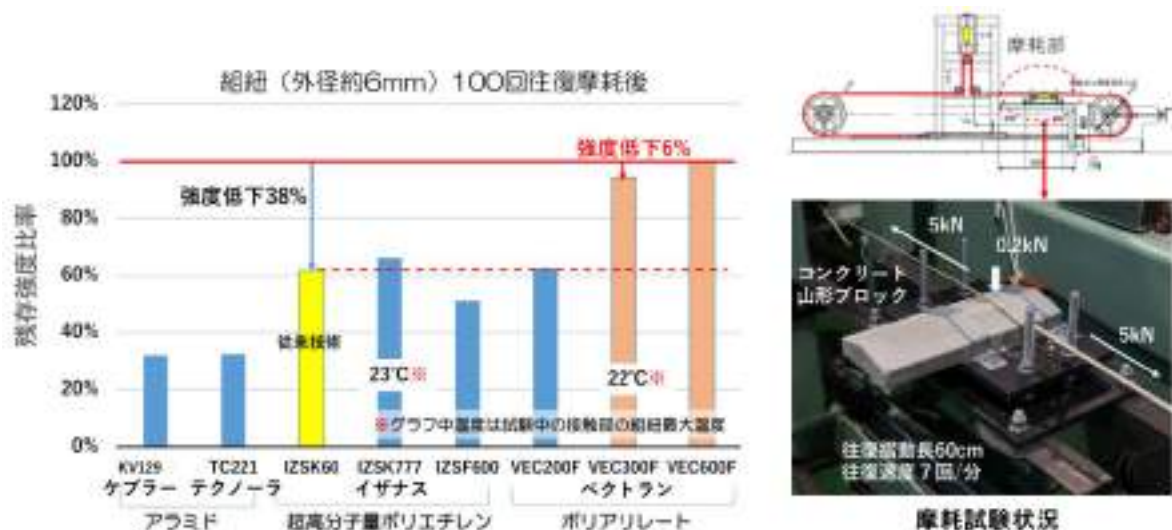


図9 コンクリート山形ブロックとの摩耗試験後の強度低下率

試験の結果、従来の代表的イザナス繊維の組紐は強度低下率が 38%であるのに対し、代表的ベクトラン繊維の組紐は強度低下率が6%以下と高い耐磨耗性を示した。なお、アラミド繊維のケブラー繊維は極めて耐磨耗性能が低いことが分かった。

## ② 摩耗試験後の外観とSEM観察

新品の組紐とコンクリート山形ブロックとの摩耗後の組紐の外観は、ケブラーの摩耗による毛羽立ちが顕著であるが、他はあまり毛羽立っていない。また、イザナスの組紐は、細く硬くなっている(図 10 上)。

摩耗試験後の摩耗部の繊維を SEM 観察すると、ケブラー繊維は繊維を割くようなフィブリル化が顕著であったが、ベクトラン繊維のフィブリル化は部分的であった。イザナス繊維は、他と異なり対象との接触部の繊維同士が溶着して扁平化されているものが多い(図 10 下)。これはポリエチレンが熱に弱く約 60°C で軟化するためと思われる。

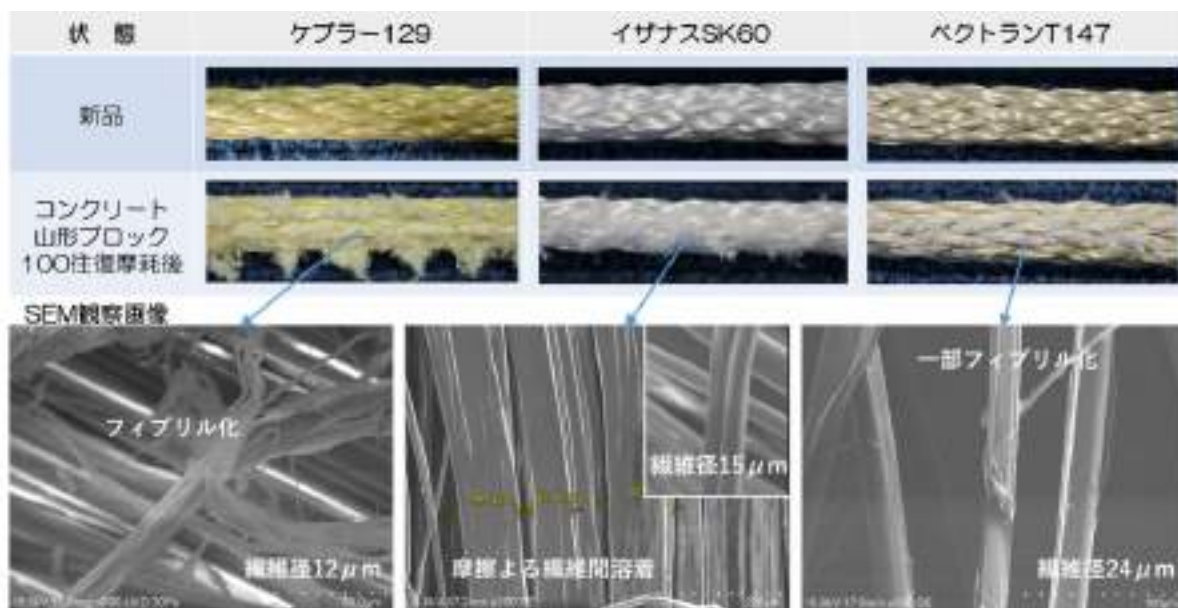


図 10 摩耗試験後の組紐の外観と繊維の SEM 観察結果

#### (4)耐摩耗繊維の選定

ベクトランは、紫外線に弱いものの、疲労・摩耗に強いなど総合的に優れた性能を示すことからベクトラン繊維を第一候補とした。従来技術で使われてきたイザナス繊維は、熱に弱いものの、水に浮き海洋用途で必要とされることから、イザナス繊維(SK777)を第二候補とした。ケブラーは耐疲労性能、耐摩耗性能が極めて低く、今回対象外とした(表2)。

表2 総合的な各繊維の性能比較結果

繊維種類	アラミド繊維		超高分子量 ポリエチレン繊維		ポリアリレート 繊維
	ケブラー 129	テクノーラ T-221	イザナス		ベクトラン
			SK60	SK777	300F
組紐強度 (kN)	○36.5	○36.0	○40.4	◎51.4	○37.8
5kN時外径 (mm)	7.7	7.6	8.0	7.3	5.8
低伸び特性	○	○	△初期伸び大	△初期伸び大	○
温度特性(軟化温度)	○300°C以上	○300°C以上	△148°C	△148°C	○300°C以上
摩擦係数	大	大	小	小	中
耐疲労性能	×	×	○	○	◎
耐摩耗性能	×	×	△	△	◎
比重	1.45	1.32	0.97	0.97	1.41
選定	-	-	-	第二候補 (海洋用途)	第一候補

凡例 (相対評価)

× : 問題あり

△ : やや劣る

○ : 良好

◎ : 最も良好

#### 【1-2】摩耗低減構造の開発(高木綱業, 県産技センター)

第一候補のベクトラン繊維を芯材に用いて、樹脂製管路等摩耗条件が緩い個所に適用する「一層タイプ」、コンクリート管路等摩耗条件が厳しい個所に適用する「二層タイプ」を開発した(図11)。



図11 「一層タイプ」及び「二層タイプ」の概要

「二層タイプ」の編組は、今回導入した製紐機を用いて、構造や材質を変えながら試作を進めた。

編組は、芯材を保護する役目を果たすが、編組することにより芯材だけの時より屈曲疲労性能が大きく低下するということがわかり、その対策としても複合編組とすることが有効であることを発見した。そこで後半は、ポリエステルとイザナスの複合編組の開発を重点的に進めた(図12)。

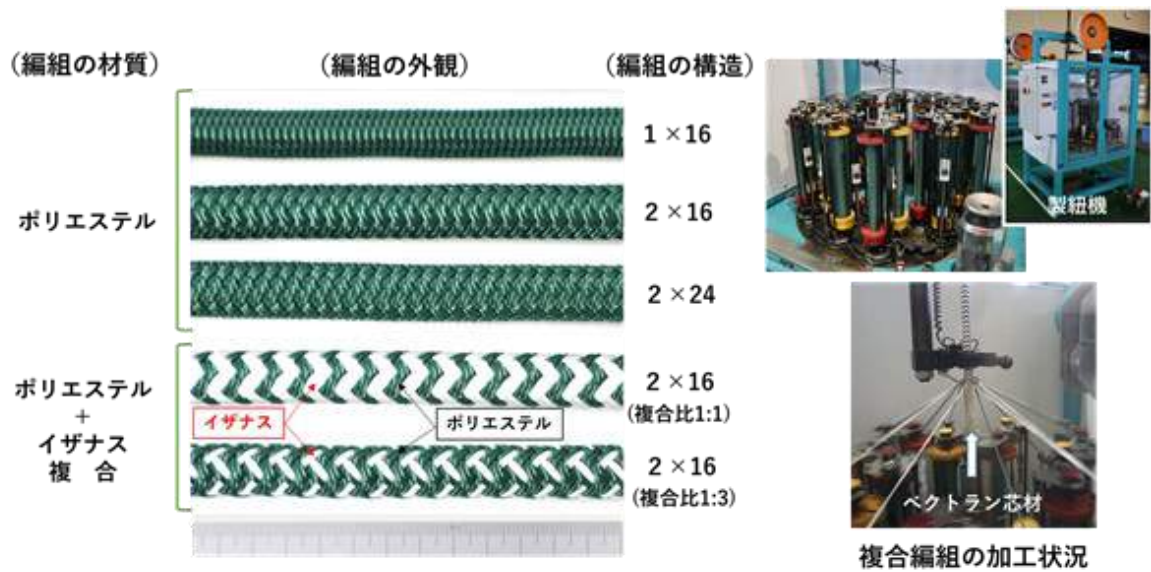


図 12 二層タイプの編組の試作例

【1-3】コーティング樹脂の開発(高木綱業, 県産技センター)

(1)開発方針

当初、コーティング樹脂は耐摩耗性能と耐疲労性能を向上させる目的で、「一層タイプ」の芯材表面へコーティングする樹脂と、「二層タイプ」の芯材と編組の間にコーティングする樹脂の開発を進め、「一層タイプ」、「二層タイプ」ともシリコン樹脂塗工が耐疲労性能の向上に極めて有効であることが分かった。しかし、逆に繊維の耐摩耗性能が低下することや、滑り易くキャプスタンウィンチで巻けない、べとつきがあり扱いにくい、高価であるなどの課題があることがわかってきた。

また、「一層タイプ」で最も重要なのは紫外線による強度低下の防止対策であることが明確になり、「二層タイプ」では複合編組が総合的に有効であることが分かってきた。

このため、図 13 に示すように、「一層タイプ」は耐候性向上対策を中心に樹脂開発を進めることとし、「二層タイプ」は複合編組を中心に開発を進めることとした。

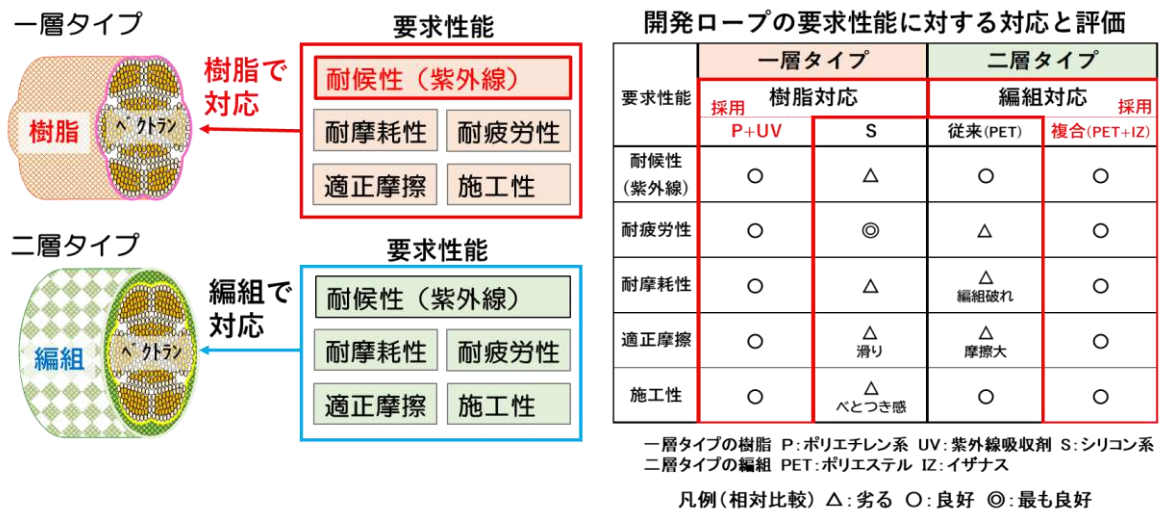


図 13 要求性能に対するロープタイプ毎の対応方針と評価

## (2)「一層タイプ」用耐候性コーティング樹脂の開発

### ① 樹脂の候補選定

県産技センターの「紫外線促進耐候試験機」を用いて、ベクトラン繊維の紫外線暴露試験を実施し、ベクトラン繊維の表面の劣化状況をSEM観察により確認した(図14、図15)。

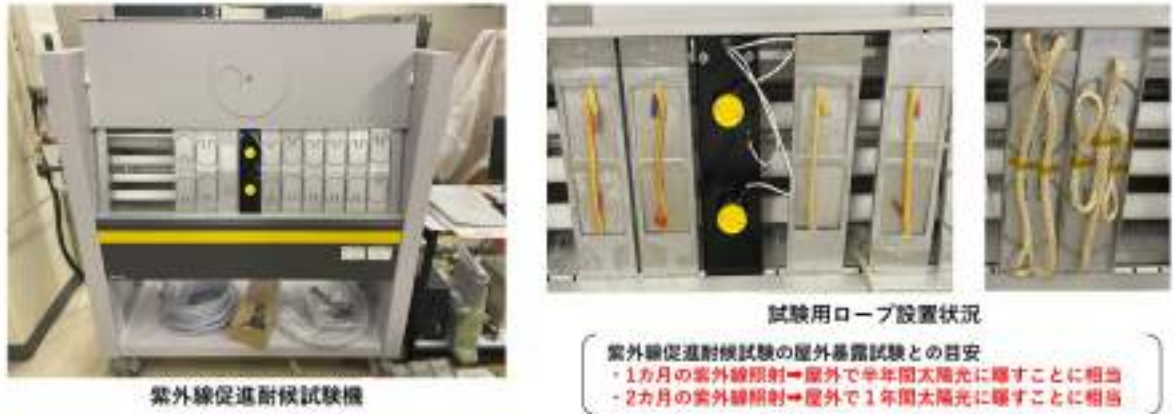


図 14 紫外線促進耐候試験機への試料(組紐)設置状況

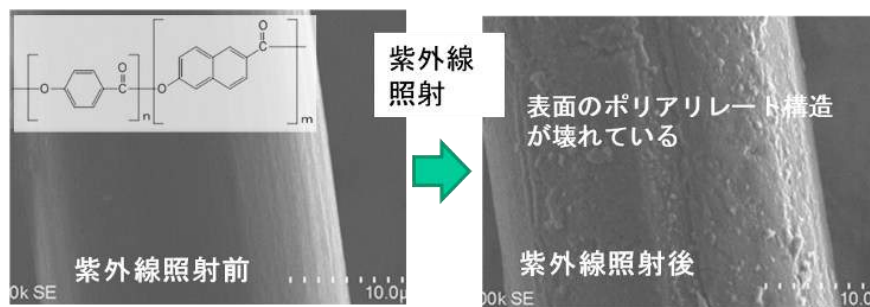


図 15 紫外線照射前後のベクトラン繊維のSEM観察結果

「一層タイプ」の繊維の紫外線劣化を防止し耐候性を高めることを目的に、コーティング樹脂の開発を行った。まず、紫外線吸収剤の効果について検討を行うために、化学構造の異なる5種類の紫外線吸収剤をベース樹脂に添加し、紫外線照射を行った。その結果、3種類が良好な紫外線吸収特性を有することを確認した(図16)。

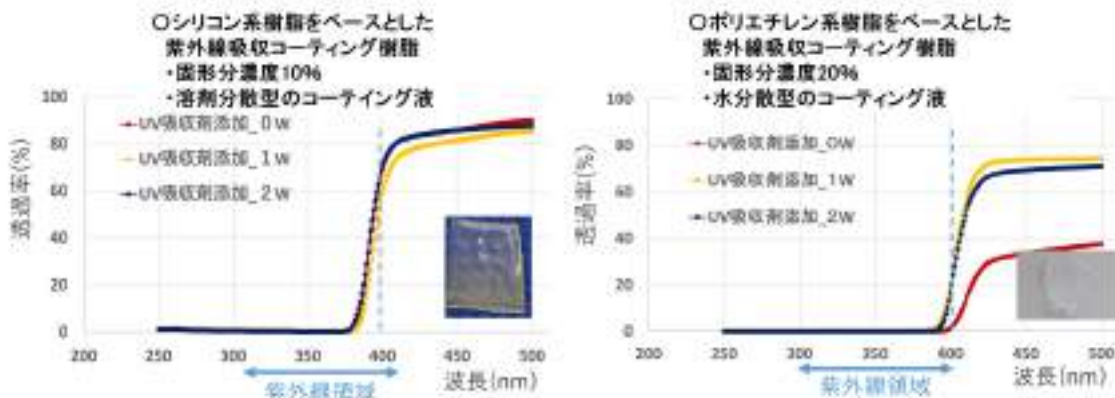


図 16 紫外線促進耐候試験機を用いた UV 吸収特性の確認

## ② 組紐での耐候性評価

選定した紫外線吸収剤と2種類のベース樹脂を組み合わせ耐性樹脂を試作し、これを組紐に塗工した試料を作成した。この組紐を前出の紫外線促進耐候試験機にセットし、屋外暴露 0.5 年、1 年相当の紫外線照射を行った。

### (外観、SEM観察)

樹脂塗工のないベクトラン組紐の外観は、紫外線照射後は黄変し、繊維に亀裂が入るなどしている。一方、紫外線吸収剤樹脂(P+UV)を塗工した組紐は色の変化がほとんどなく、繊維も表面に浅いひび割れが確認できる程度であり、紫外線吸収剤の効果が確認できた(図 17)。



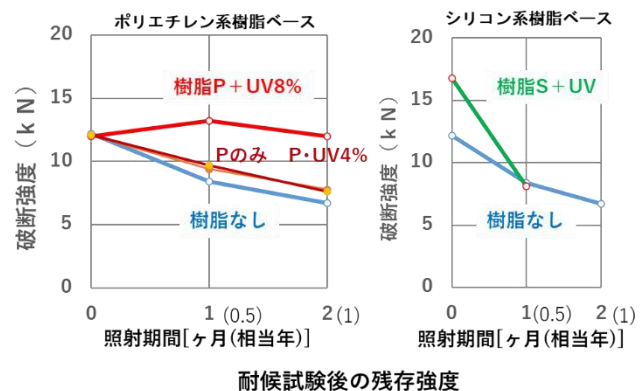
図 17 耐候試験前後の組紐の外観及びSEM観察結果

### (残存強度試験)

樹脂なし(青ライン)では紫外線照射前の強度が 12kN程度であるのに対し、紫外線照射 2ヶ月(屋外暴露1年相当)の残存強度は7kNと半分程度に低下した。水分散型のポリエチレン系樹脂のみ「P」と、これに紫外線吸収剤を固形分濃度4%で添加した「P+UV4%」は、強度低下が大きく、ほとんど効果がなかった。

これに対し、紫外線吸収剤を固形分濃度8%で添加した「P+UV8%」(赤のライン)は、紫外線照射2ヶ月(屋外暴露1年相当)後もほとんど強度低下がなく、耐候性向上効果が認められた。

溶剤分散型のシリコン系樹脂に紫外線吸収剤を添加した「S+UV」(緑のライン)は、紫外線照射後は強度低下が大きく、ほとんど効果がないことが分かった(図 18)。



残存強度試験方法

図 18 耐候試験後の残存強度

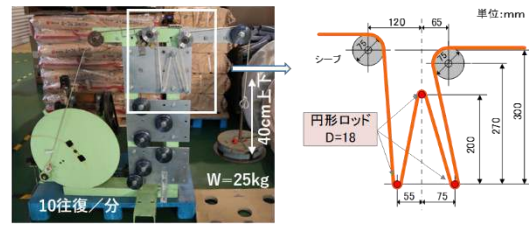
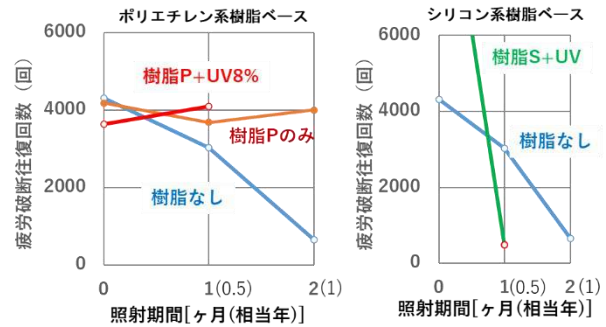
### (繰返し疲労試験)

樹脂なし(青ライン)では紫外線照射前は4,000回で破断するのに対し、紫外線照射2ヶ月(屋外暴露1年相当)では600回程度で破断した。

これに対し、紫外線吸収剤を添加した「P+UV8%」(赤のライン)は、紫外線照射後も破断に至る回数の低下がほとんどなく、耐候性向上効果があることが分かった。

溶剤分散型のシリコン系樹脂に紫外線吸収剤を添加した「S+UV」(緑のライン)は、紫外線照射後は破断に至る回数が大幅に低下し、ほとんど効果がないことがわかった(図19)。

※「P+UV8%」の2カ月は、再試験を検討中。



繰返し疲労試験方法

図19 耐候試験後の繰返し疲労試験結果

### (3)コーティング樹脂のまとめ

これらの残存強度と疲労試験結果から、「ベクトラン一層タイプ」の課題である耐候性向上対策については、水分散型のポリエチレン系樹脂に紫外線吸収剤を固形分濃度8%で添加した「P+UV8%」が有効であることがわかり、これを採用した。

現在は、外径14mmの「ベクトラン一層タイプ」を試作し、R6年11月～R7年10月までの1年間、さぬき工場の外柵で屋外暴露させている(図20)。今後R7年11月に撤去し、残存強度試験と繰返し疲労試験を実施し、実際の屋外暴露における耐候性の評価を行う予定である。



図20 ベクトラン「一層タイプ」φ14mmの屋外暴露試験状況

### 【1-4】摩耗低減性能の評価(高木網業, 県産技センター)

摩耗は、ロープ本体の摩耗と、ロープが接触する摩擦対象物の摩耗があり、各々評価を行った。

### (1) ロープ本体の摩耗

ロープ本体の摩耗低減性能は、新品に対する摩耗後の強度低下を試験し、従来技術のイザナス「一層タイプ」とイザナス「二層タイプ」を比較した。「一層タイプ」、「二層タイプ」ともに、円弧コンクリートブロック以外の円弧鉄板、ケーブル管路では、ほとんどロープの摩耗がなかった。そこで、円弧コンクリートブロックのみでロープ本体の摩耗試験を実施し評価した(図 21, 図 22)。

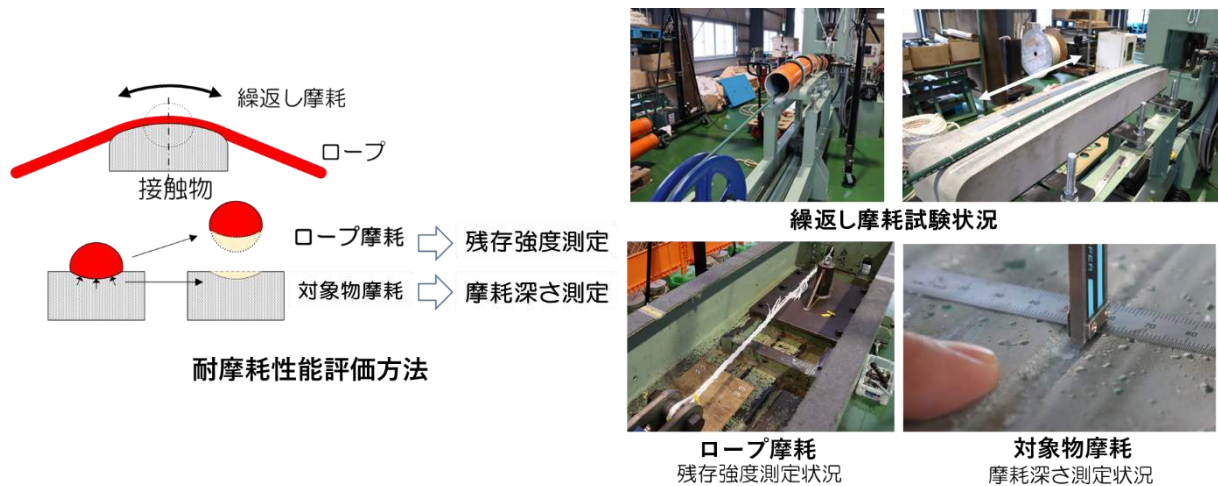


図 21 ロープ本体摩耗と対象物摩耗の試験・測定方法



図 22 様々な摩耗対象による試験

### ① 円弧コンクリートブロックと「一層タイプ」の摩耗

曲率半径 10m の円弧状のコンクリートブロックを対象に 20kN の張力をかけ、1分間6往復とし、イザナスで 100 往復、ベクトランで 700 往復させた(図 23)。(イザナスのみ 100 往復としたのは、これ以上の回数では、繊維間が溶着し強度試験のための端末加工ができなくなるため)

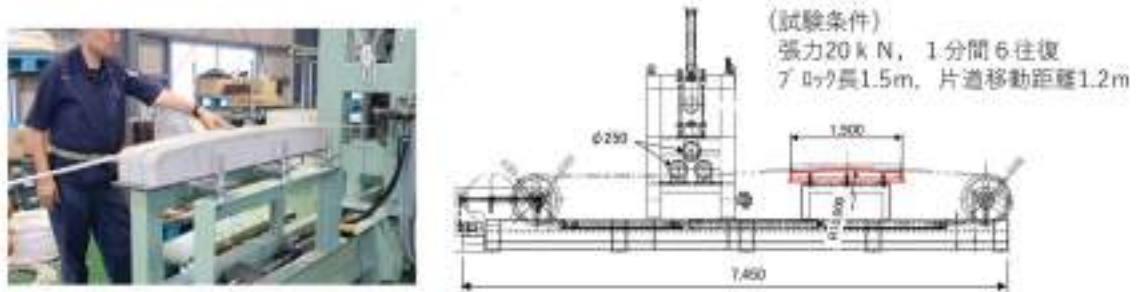


図 23 円弧コンクリートブロックでの摩耗試験状況

摩耗後のロープ表面状態は、イザナス「一層タイプ」は燃りのストランドの山が削れたようになったが、ベクトランはほとんど摩耗がなかった。イザナス「一層タイプ」は 100 回往復で 35%の強度低下であったが、ベクトラン「一層タイプ」ではどの試作においても 700 回往復でも 10%以下の強度低下であった。

また、樹脂を塗工した場合はむしろ強度が摩耗前より上がるものもあった(図 24)。これは、イザナス繊維は軟化温度が 60°C程度であり摩擦熱により材料が軟化し摩耗が促進されるとともに強度低下するのに対し、ベクトラン繊維は軟化温度が 300°C以上であるため、摩耗しにくく、強度低下が小さかったものと考えられる。

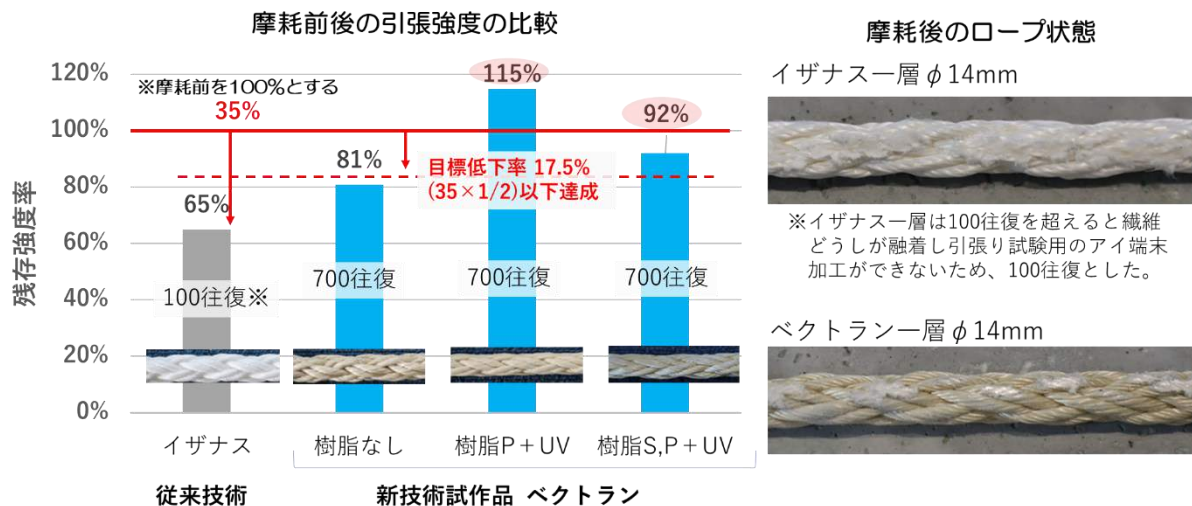


図 24 円弧コンクリートブロックでの摩耗後の「一層タイプ」の状況と残存強度率

### ②円弧コンクリートブロックと「二層タイプ」本体の摩耗

「一層タイプ」と同様に曲率半径 10m の円弧状のコンクリートブロックを対象に 20kN の張力をかけ、1分間6往復で 700 往復させた。

従来型の編組を施したロープは、どちらも約 250 回程度で編組が破れて芯材が露出し、その後は芯材とコンクリートの摩耗となった。700 回摩耗後の芯材の摩耗状態はイザナス、ベクトランともほとんど変わらず、摩耗後の残存強度の低下率は同程度となった。これは「二層タイプ」では、芯材の撚りの構造やピッチから摩擦抵抗が小さく、摩擦面の温度が 50℃程度までしか上昇しなかったため、熱に弱いイザナス芯材の強度低下が小さかったことによると考えられる。ベクトランの芯材にシリコン樹脂を塗工するとむしろ芯材の摩耗が促進される結果となった(図 25)。

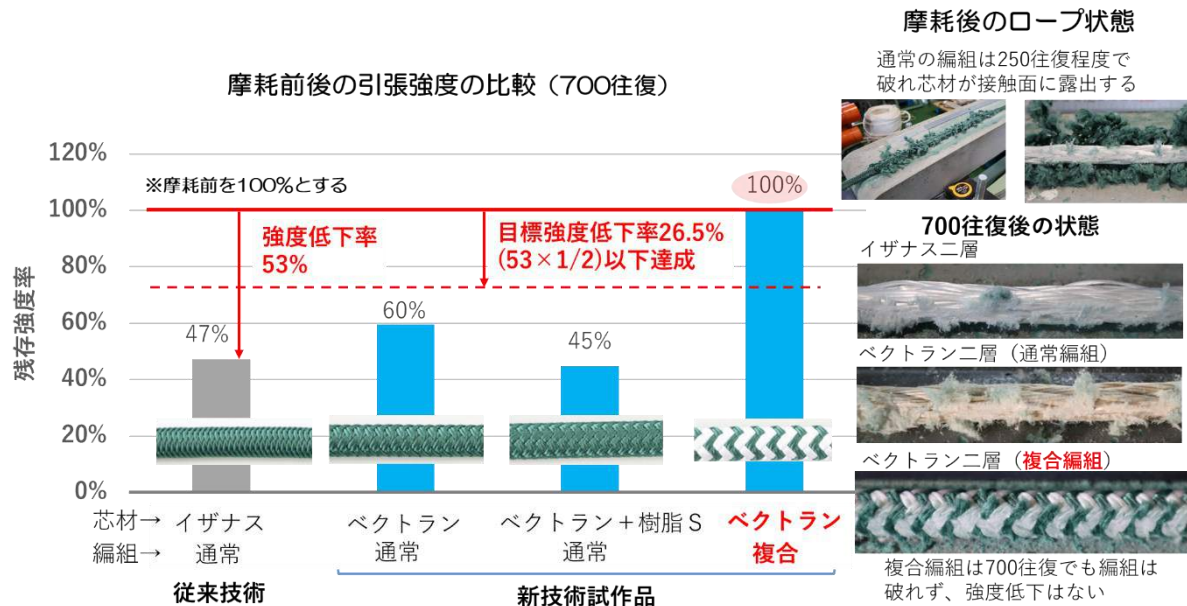


図 25 円弧コンクリートブロックでの摩耗後の二層タイプロープ状況と残存強度率

そこで、編組を緑のポリエステルと白のイザナスを組み合わせた複合編組にすると、700 回摩耗後も編組の破れは起こらず、試験後の強度低下がなくなった。これは、イザナスがポリエステルより摩耗に強いことを示している。また、従来編組では、大きく耐屈曲疲労性能が低下するが、後に示すように、複合編組にすることにより大幅に耐屈曲疲労性能が向上するというメリットも発見され、複合編組を有望視することとした。

## (2)対象物の摩耗

高張力疲労・摩耗試験装置を用いて、ロープが摩擦対象物をどれだけ摩耗させるか試験を行った。

### ① 円弧コンクリートブロック摩耗試験

製作した円弧コンクリートブロックを、ワイヤーロープを張力 10kN で摩耗させた結果、みるみるコンクリートが削れ 10 往復で深さ約 2.5 mm の溝ができた。

一方、開発ロープを含めた繊維ロープ(一層二層全て)は、張力を 20kN とし 700 回往復させた場合でも、ロープが通った跡が黒く変色するだけで、コンクリートの摩耗は目視、手触りともに摩耗は確認されなかった(図 26)。



図 26 円弧コンクリートブロックの摩耗状況

## ② 円弧鉄板摩耗試験

ワイヤーロープは、張力10kNで円弧状に曲げた鉄板を摩耗させた結果、短時間で鉄板が削れ、10往復で深さ約1mmの溝ができた。一方、繊維ロープは、一層二層のどの種類でもロープが通った跡が黒く変色するだけで、鉄板の摩耗は一切なかった(図 27)。



図 27 円弧鉄板の摩耗状況

## ③ ケーブル管路試験

実際に現場で使われているケーブル管路であるポリコンFRP管と硬質ポリエチレン管を高張力摩耗・疲労試験装置にセットし、摩耗試験を行った(図 28)。

摩耗試験では、実際の現場の牽引条件を考慮し、管路の曲率半径 10m、張力 20kN で 100 回往復させて、管路の摩耗状況を確認した。

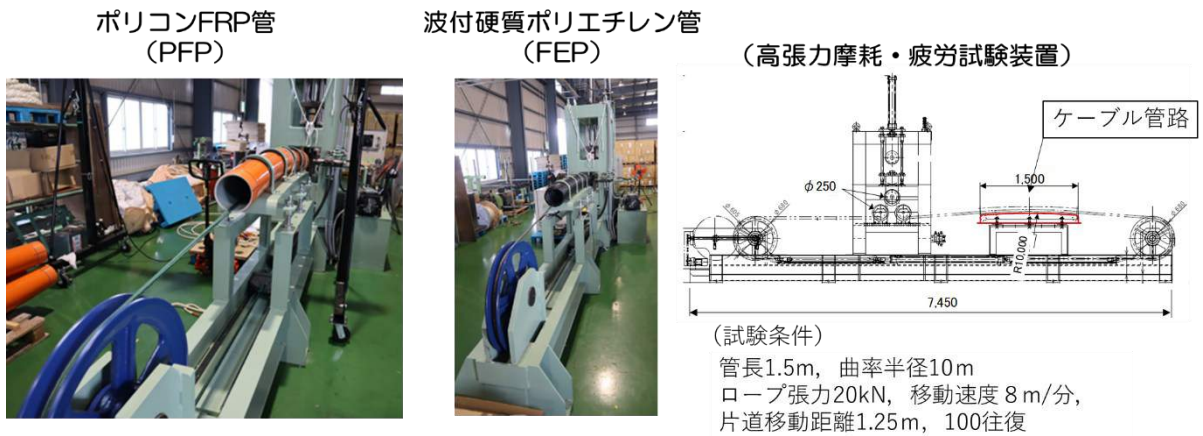


図 28 ケーブル管路摩耗試験状況

(ポリコンFRP管)

ポリコンFRP管は、重要な地中送電ケーブル用の管路で、内面・外面が樹脂で保護された FRP 層で、中間に樹脂モルタル層を入れたサンドイッチ構造となっている。

試験の結果、開発した一層二層ロープともに目視、手触りともに摩耗は確認されなかった。一方ワイヤーロープは1mm程度の溝ができ、ワイヤーロープ自身にも内面が削られた粉が付着した(図 29)。

(試験条件) ロープ径14mm、張力20kN、曲率半径10m、摩擦長1.25m、100往復

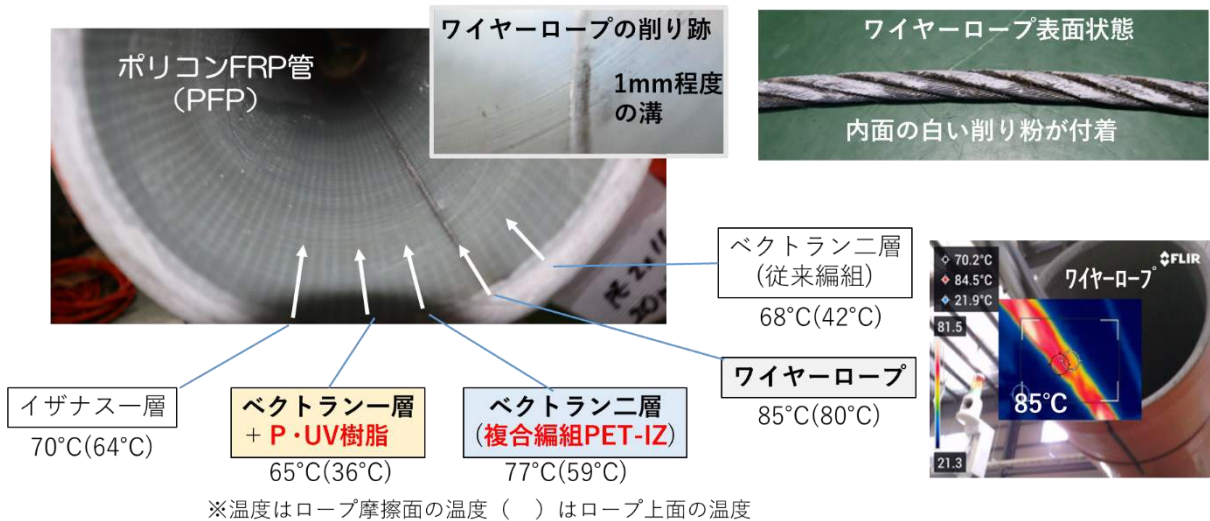


図 29 ポリコンFRP管摩耗試験状況

(波付硬質ポリエチレン管)

硬質ポリエチレン管は、最近、コストを抑えるために再エネ関係のケーブル管路として使われる場合が増えてきた。波付硬質ポリエチレン管は、ワイヤーロープは内面に機械的な筋状の傷がついた。イザナス「一層ロープ」は内面にざらついた筋状の傷ができたが、開発したベクトラン一層タイプは摩擦面に光沢が出る程度で、摩耗はなかった。

開発したベクトラン「二層タイプ」でポリエステル編組を施したロープは、摩擦面の温度が 110℃に上昇し、管が軟化変形し溝ができた。これに対し、編組をポリエステルとイザナスの複合編組とした場合は、温度が 80℃程度に抑えられ摩擦面に光沢がでる程度で摩耗はなかった。

これらの結果から、開発したベクトラン「一層タイプ」、ベクトラン「二層タイプ(複合編組)」は、ワイヤーロープに対してロープの摩耗が 1/5 以下となることを確認した(図 30)。



図 30 エフレックス管(硬質ポリエチレン管)摩耗試験状況

#### (摩耗形態の整理)

これまでの摩耗形態を整理すると、対象が物理的に削れるアブレッシブ型(削り取り型)と、対象が軟化し変形する熱変形型に分かれる。

アブレッシブ型は、摩擦係数が高い鋼やコンクリートの対象物を、高硬度のワイヤーロープで摩擦することにより削り取られるもので、ワイヤーロープの使用には注意が必要である。

一方、熱変形型は、耐熱性が低く軟化温度の低い硬質ポリエチレンの対象物に対し、摩擦係数が比較的大きい。また熱伝導率の小さいポリエステル編組したロープで摩擦した時には、摩擦面の温度が上昇し、硬質ポリエチレンが軟化変形し溝になる。そのため、ポリエステル編組のロープの使用には、注意が必要であるが、使用条件が緩く温度上昇が小さい場合は問題ない。

## 【1-4】摩耗低減性能の評価

摩耗低減性能の総合的な評価を表3に示す。

表3 摩耗低減性能の総合評価

ロープ本体 の摩耗	摩擦対象	一層タイプ		二層タイプ	
		従来（基準）	開発品	従来（基準）	開発品
		イザナス層	ベクトラン層 P+UV樹脂	イザナス二層	ベクトラン二層 複合編組
円弧コンクリート	△	○	△	○	
円弧鉄板 ほか	○	○	○	○	

摩擦対象物の 摩耗	摩擦対象	従来（基準）	一層タイプ	二層タイプ	
		ワイヤーロープ	開発品	開発品	開発品(採用)
			ベクトラン層 P+UV樹脂	ベクトラン二層 従来編組	ベクトラン二層 複合編組
円弧コンクリート	×	○	○	○	
円弧鉄板	×	○	○	○	
P F P管(ポリコンFRP)	△	○	○	○	
F E P管(硬質PET)	△	○	△	○	

凡例(相対比較) ×: 摩耗する △: 少し摩耗する ○: 耐摩耗性あり

ベクトランを芯材に用いた最終開発ロープ(「一層タイプ」、「二層タイプ」)は、摩耗条件の厳しいコンクリートとの摩耗も含め、どの条件でも従来技術の繊維ロープに対して、優れた耐摩耗性能を示した。これらの結果から、摩耗による引張強度の低下率を50%以上低減する目標を達成した(前述 図24、25)。

摩擦対象物の摩耗では、基準のワイヤーロープがコンクリートと鉄を摩耗させてしまうのに対して、開発したロープは確認できる摩耗はなかった。

実際のケーブル管路のポリコンFRP管、波付硬質ポリエチレン管に対しても、基準のワイヤーロープは若干削れて溝ができるものの、最終開発ロープでは、確認できる摩耗がなかった。

これにより、最終開発ロープは、摩擦対象物の摩耗の深さを1/5以下とする目標を達成した。

## 【2】摩擦制御技術の開発

キャプスタンウィンチでロープを用いてケーブルを牽引する場合、摩擦が小さいとロープがキャプスタン上で滑って巻き取れない。また、摩擦が大きすぎるとロープがキャプスタン上で横方向に滑らずロープ同士が乗り上げ巻き取れなくなるため、適切な摩擦が必要となる。

また、ロープを緩めて少し送り出そうとすると、スティックスリップ振動が発生して滑らかに送り出すことができず不安全となる場合がある(図31)。



図31 ロープのスティックスリップ振動

このスティックスリップ現象を実用上問題ないレベルに抑制するために、産総研の協力のもと、この現象の発生条件を明らかにするとともに、樹脂や編組を改良して摩擦を制御する技術を開発した。

### 【2-1】スティックスリップ振動の解明(高木綱業)

開発した摩擦試験装置を用いて、試作した各種繊維の組紐を鋼管などに巻付けて摩擦係数を測定するとともに、スティックスリップ振動を再現させ、振動と張力と滑りの関係を測定した(図 32)。

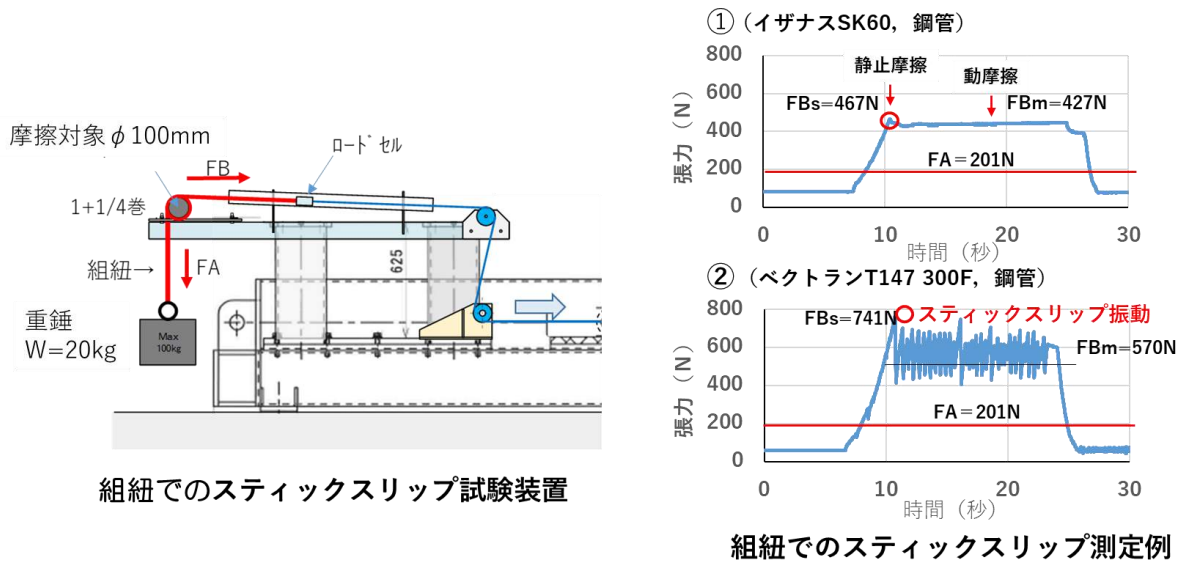
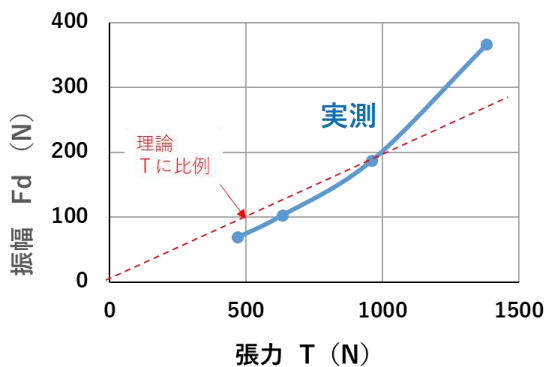


図 32 スティックスリップ振動の測定例 (組紐使用)

この時、錘の重量などの条件を変更することで、「張力」及び「スティックスリップ振動の振幅」並びに「スティックスリップ振動の周期」の相関を見出した(図 33)。

張力とスティックスリップ振動の振幅の関係

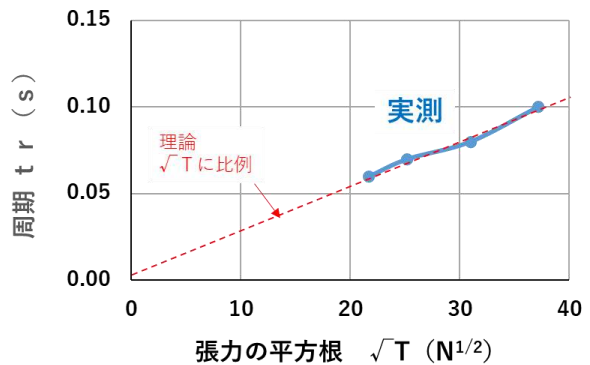


(理論式)

$$F_d = \pi (\mu_s - \mu_k) \cdot T$$

T : 張力 (N)  
 $F_d$  : スティックスリップ振動の振幅 (N)  
 $r$  : パイプの半径 (m)  
 $\mu_s$  : 静摩擦係数  
 $\mu_k$  : 動摩擦係数

張力とスティックスリップ振動の周期の関係



(理論式)

$$t_r = \pi (\pi \cdot T / 2 \cdot g \cdot k)^{1/2}$$

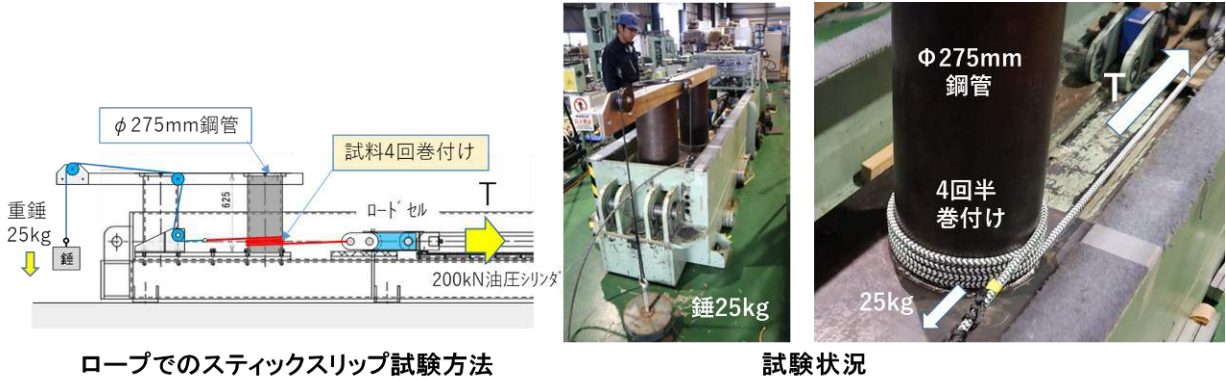
T : 張力 (N)  
 $t_r$  : スティックスリップ振動の周期 (s)  
 $r$  : パイプの半径 (m)  
 $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)  
 $k$  : バネ定数 (N/m)

図 33 スティックスリップ振動の振幅と周期

**【2-2】スティックスリップ振動防止対策の開発(高木綱業)**

**(1) 開発ロープを用いた模擬試験**

キャプスタンウインチを模擬して鋼管に4回半巻付け、片端に人が引っ張る力を想定して 25 kgの錘で張力をかけた状態で、右に引っ張った時の張力Tの変動を測定した(図 34)。

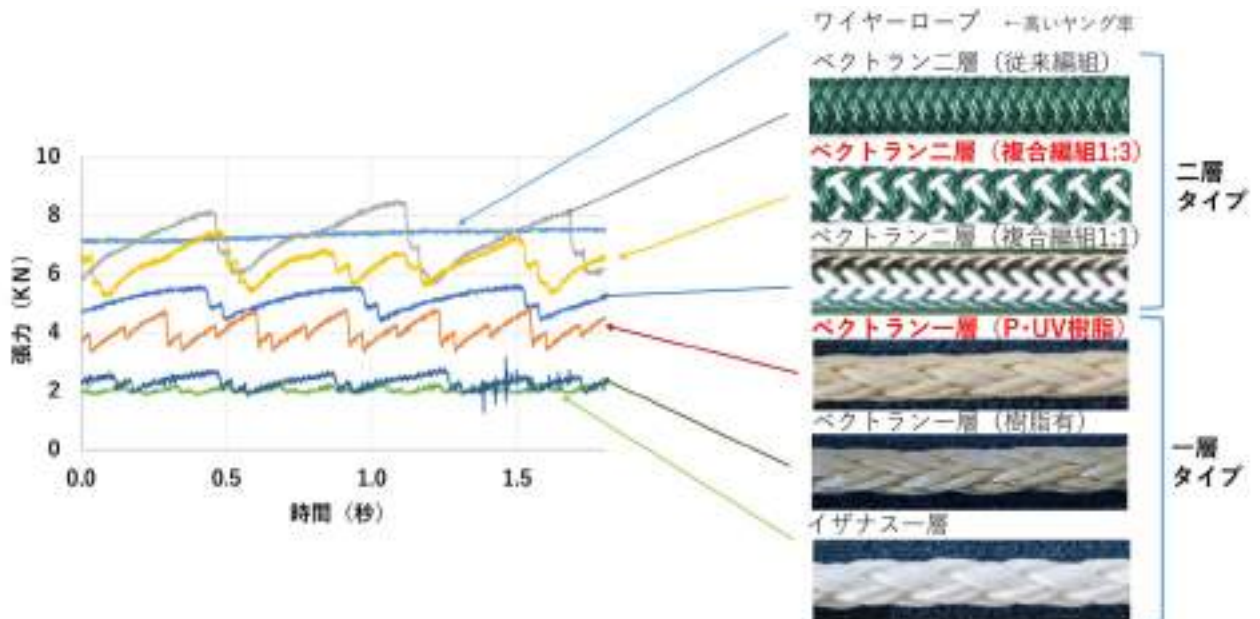


**図 34 開発ロープを用いたスティックスリップ振動の測定**

各ロープの張力変動を図 35 に示す。このグラフでワイヤーロープを除き、理論どおり、「牽引張力が大＝摩擦係数大→スティックスリップ大」、「牽引張力が小＝摩擦係数小→スティックスリップ小」となった。スティックスリップを抑制するためには、摩擦係数を小さくすることが有効であり、「一層タイプ」では樹脂塗工により、「二層タイプ」では編組を複合化することが有効であることを確認した。

ただし、摩擦係数が小さくなるとキャプスタンウインチで牽引できる張力が小さくなるが必要であり、使用条件に適したロープの選定が必要となる。

ワイヤーロープは、張力が大きいにもかかわらず、スティックスリップが発生しないのは、伸びが小さいことと、ロープとキャプスタンの材質が鋼であり、油も付着していることによると考えられる。



**図 35 開発ロープのスティックスリップ測定結果**

## (2) 実際のキャブスタンウィンチを用いた試験

キャブスタンウィンチ(アドバイザーの三友電工株式会社から借用)にロープを巻き付け、負荷を模擬したトラックを牽引し、「車を停車させ牽引する場合」「車をバックさせ少しずつ送り出す場合」にスティックスリップ振動が発生しないかどうかを確認した(図 36)。

その結果、実際のキャブスタンウィンチでの巻取り時、作業員側では、微小なスティックスリップも感じなかった。唯一、「一層タイプ」をキャブスタン上で滑らせた時に、若干スティックスリップを感じたものの、これは、施工上問題にならないレベルであった。さらに開発した「二層タイプ」でも、スティックスリップの発生はなく、実用上問題ないことがわかった。

よって、実用上支障となるスティックスリップは発生していないことから、「ウィンチ巻取り時のスティックスリップなし」という目標を達成した。



図 36 キャブスタンウィンチでのスティックスリップ確認試験状況

## 【3】取扱基準の設定

### 【3-1】各種性能試験の実施(高木網業)

#### (1) 試験項目と試験装置

取扱基準を設定するため、開発した試験装置を活用して各種性能試験を実施した(図 37)。

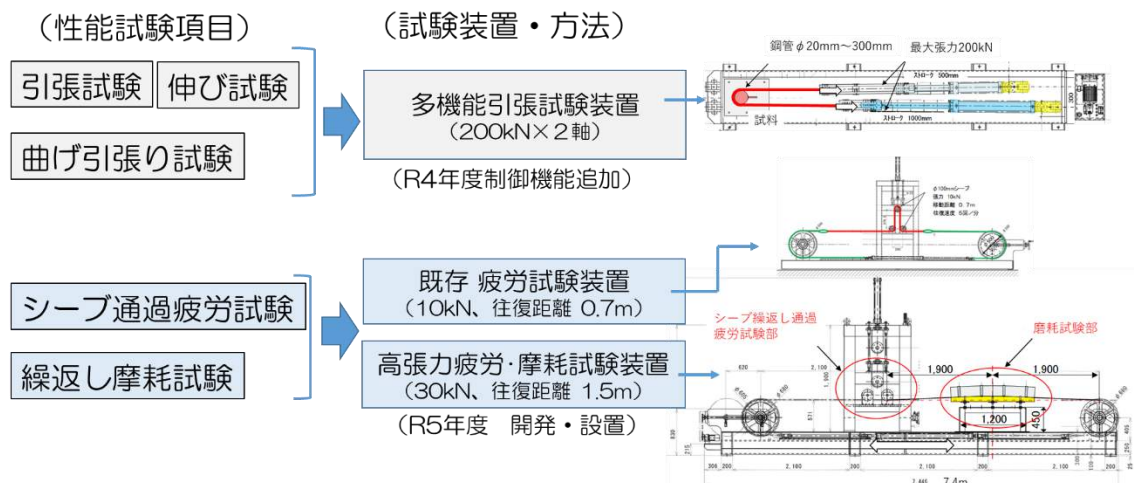


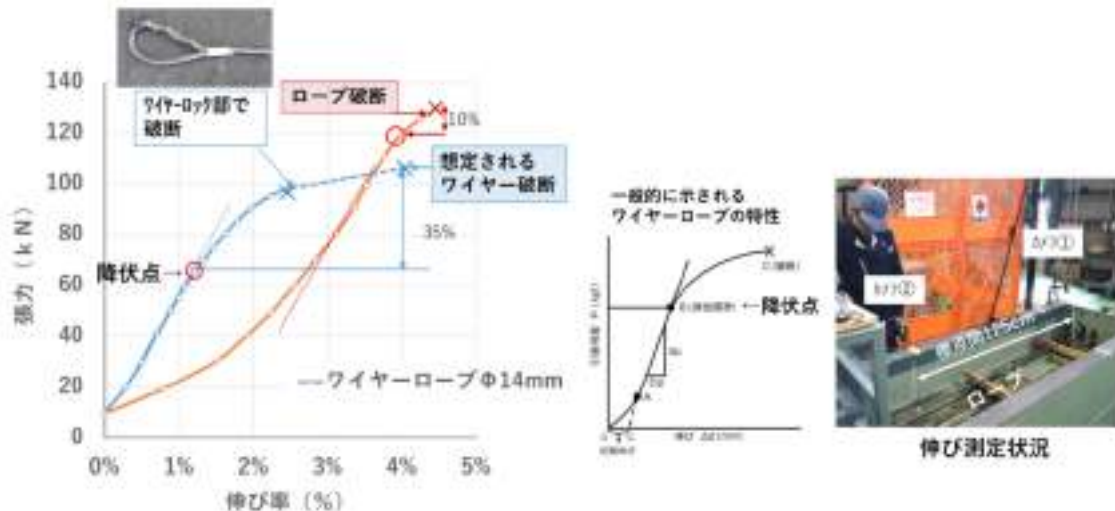
図 37 各種性能試験項目と試験装置

## (2) 性能試験結果

### ① 引張り試験・伸び試験

ワイヤーロープとベクトランロープ(①②の試験は「一層タイプ」)の引張り試験を行い、破断までの伸び測定を、開発したカメラ型の伸び測定装置を用いて行った。その結果、初期伸びはワイヤーロープの方が小さいが、初期伸び後の伸び率は両者ほぼ同等であることがわかった。

ワイヤーロープは、破断荷重の約 65%程度で降伏点となり、ここまでを使用限度とし、開発したベクトランロープは、ほぼ破断まで繊維の性質が変わらず伸びるため、破断荷重の 90%までを使用限度として、安全率を考えることとした(図 38)。



### ② 曲げ引張り試験

鋼管にU字状にロープをかけ、2本が同じ張力になるように制御しながらロープを引張り、破断強度を測定した。この時、曲げ引張り強度を直線引張り強度で割った値を1から引いたものが強度低下率であり、鋼管の直径Dをロープ径dで割った値がD/dである(図 39)。

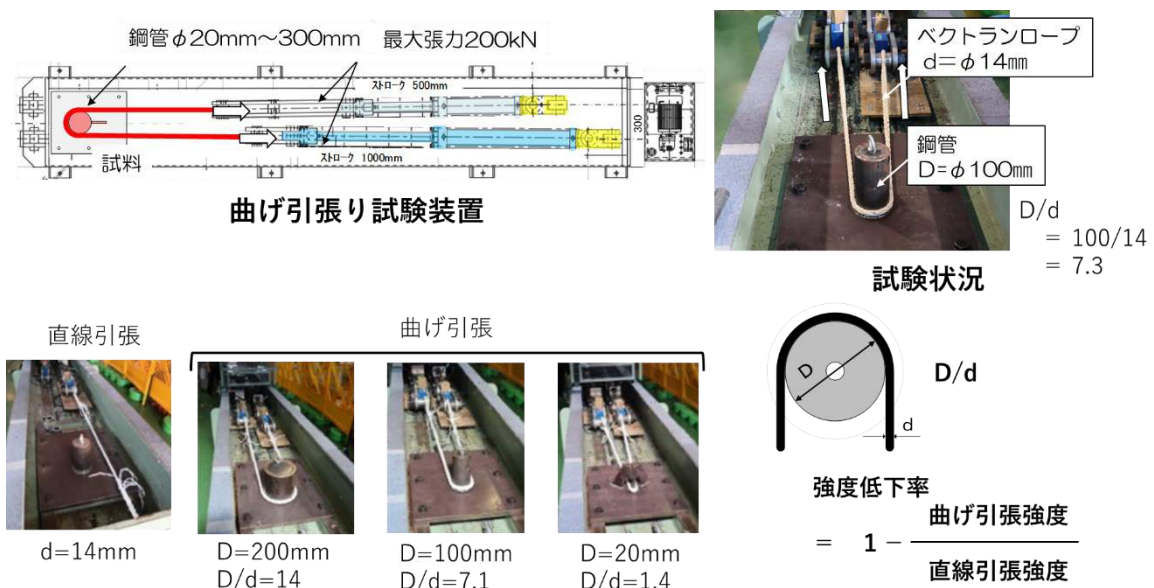


図 39 曲げ引張り試験状況

縦軸にこの強度低下率を、横軸に D/d を取ったグラフを図 40 に示す。赤と青のラインがベクトランの開発ロープのグラフで、D/d=7において5%から 10%の強度低下となる。

これに対し、ワイヤーロープは「日本鋼索工業会」において折り曲げによる強度低下事例が示されており、図 41 の灰色の実線になる。また、船舶関係の「係留設備ガイドライン」に示される強度低下率は灰色の破線となる。今回、ワイヤーロープを用いて実測したところ、その強度低下率は、この2つのラインの間となった。

ワイヤーロープの曲げ引張りによる強度低下は「グレーの範囲」、ベクトランの開発ロープの強度低下率は「赤の範囲」であり、開発ロープの方がワイヤーロープより曲げ引張りによる強度低下が小さいことがわかる。

D/d の代表的な推奨値は、「日本鋼索工業会」が 20 以上、「係留設備ガイドライン」が 15 以上としている。これに対し、ベクトランロープは 10%強度低下となる D/d が7程度となり、ワイヤーロープの推奨値「20」「15」に対し 3/40 以下の D/d=7を推奨することが可能である。

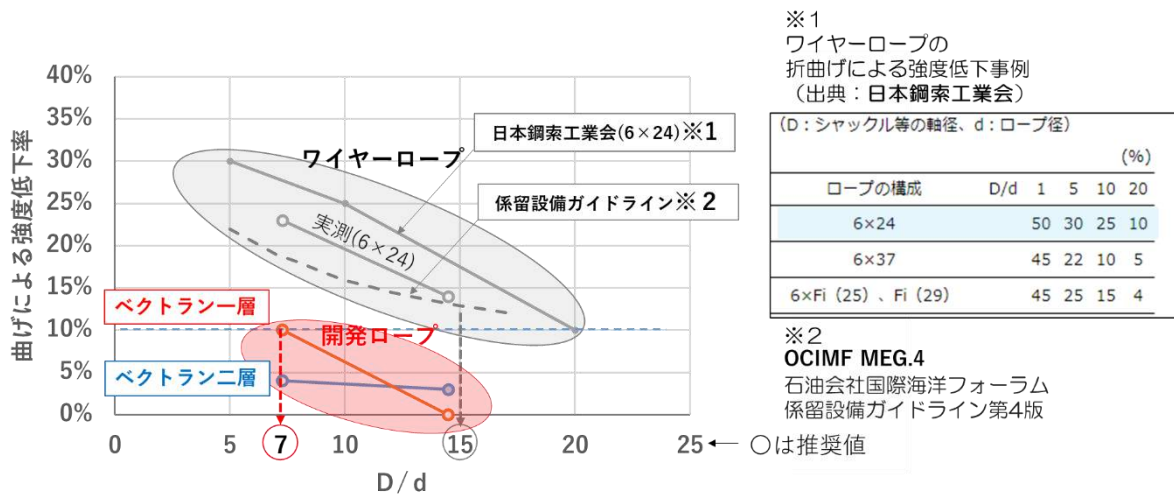


図 40 曲げによる引張強度低下率(ロープ径 14mm)と推奨D/d

### ③シーブ通過疲労試験

外径 14 mmロープの繰返しシーブ通過試験の結果の例を図 41 に示す。

ベクトラン「一層タイプ」のP・UV樹脂を塗工したロープ、ベクトラン「二層タイプ(複合編組)」のロープともに、ワイヤーロープの繰返し疲労破断回数を超えることがわかった。「二層タイプ」では、従来型の編組では 300 回程度で破断と耐屈曲疲労性能が大きく低下するが、複合編組にすることで、ワイヤーロープの3倍程度の耐疲労性能を有することを確認した。

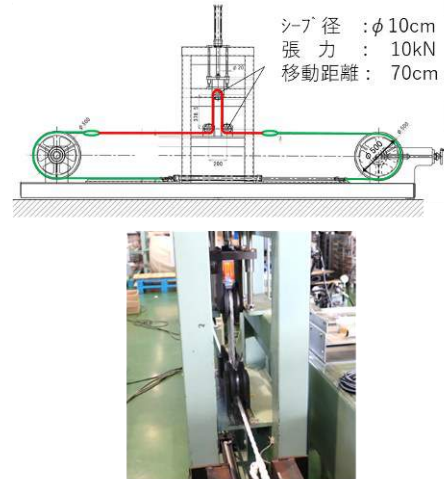
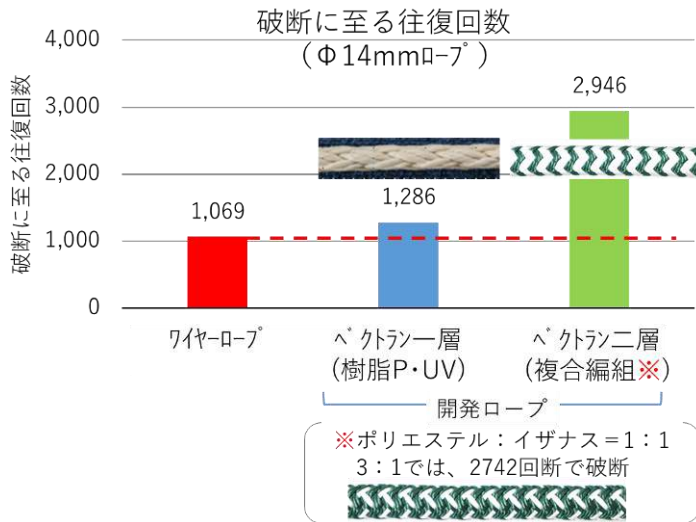


図 41 シーブ通過疲労試験結果

### 【3-2】取扱基準の設定(高木網業)

各種性能試験結果に基づき、ワイヤロープに対応する取扱基準である安全率と、D/d の設定について、考え方を図 42 に示す。

#### 安全率

- ワイヤロープに比べて
- 耐疲労性能は同等以上 (複合編組二層タイプは倍以上)
  - 曲げ引張による強度低下が小さい
  - 伸びが若干大きいため衝撃荷重が小さい
  - 降伏点がなくほぼ破断まで再使用できる
  - 腐食しない
  - ×一層タイプは紫外線劣化による強度低下度合がわからない  
→ 紫外線吸収対策が必要
  - ×二層タイプは内部の芯材の状態が点検できない  
→ 摩耗：編組の破れがなければ強度低下はない。  
疲労：ワイヤロープ以上の耐疲労性能を有するが、編組が良好でも強度低下の可能性はある。

開発したロープに関して  
ワイヤロープと同等の  
安全率を推奨

- (条件)
- ・適切な外観点検が必要
  - ・二層タイプは端部引張り試験が必要

→ 目標達成

#### D/d

曲げ引張り強度が直線引張り強度に対して10%低下するD/dは、

- ・ワイヤロープ D/d = 10~20
- ・開発ロープ D/d = 7程度

ワイヤロープの推奨  
D/d = 10~20の3/4以下の  
D/d = 7以上を推奨



図 42 安全率とD/dの設定

また、安全率を定めるためには、適切な点検方法と廃棄基準が必要となる。そこで、現在検討中の点検方法と廃棄基準の案を示す(図 43)。

## 点検基準（案） → 検討中




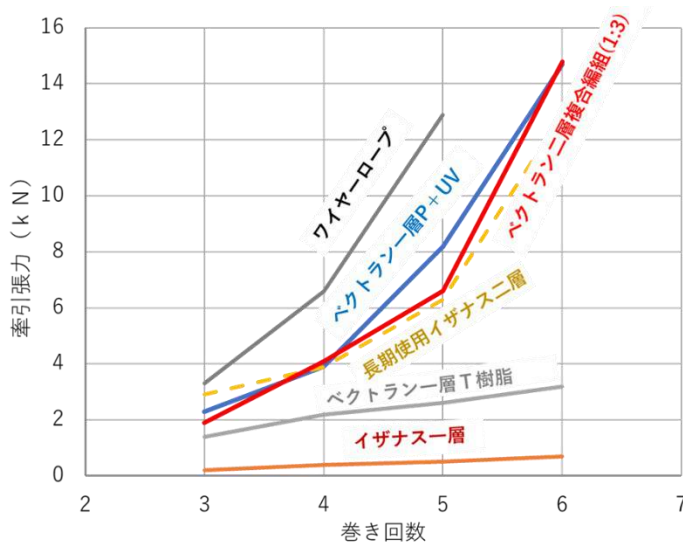
<p><b>一層タイプ</b>                  (外観・触感検査)                  ・ストランドの飛び出し、破断がないこと                  ・局所的な曲がり、細り、変形、キック、硬化がないこと                  ・ロープ径が規格径の80%以上であること                  ・外層ヤーンの切断が全体の10%以下であること                  ・外層繊維の著しい毛羽立ちがないこと                  ・外層繊維が爪で削れないこと                  (強度検査)                  ・切り出しサンプルの残存強度が70%以上であること</p> <p><b>二層タイプ</b>                  (外観・触感検査)                  ・編組の摩耗や引っ掛けによる破れがないこと                  (芯材が露出していないこと)                  ・局所的な曲がり、細り、変形、キック、硬化がないこと                  ・ロープの捻じれが1回/m以下であること                  (強度検査)                  ・切り出しサンプルの残存強度が70%以上であること</p>	<p>(使用済品の劣化状態の例)</p> <p>ワイヤーロープ</p>  <p>一層タイプ</p>  <p>二層タイプ</p> 
--	---

図 43 点検方法と廃棄基準(案)

### 【3-3】総合性能評価(高木網業, 県産技センター)

キャプスタンウインチ巻取り試験において、負荷を模擬したトラックを牽引した時の牽引可能能力とロープの硬化、細り、編組の滑り、施工性などをワイヤーロープと比較しながら試験を行い、同じ巻き回数で牽引できる最大張力を調べた(図 44)。



施工性試験状況






図 44 キャプスタンウインチでの牽引可能張力

最も大きな牽引張力はワイヤーロープで、最も小さい牽引張力はイザナス「一層タイプ」であった。必要な牽引張力の目安を知るために、現場で長期使用した従来技術のイザナス「二層タイプ」のグラフを黄色の点線で示す。開発したベクトラン「二層タイプ(複合編組)」及びベクトラン「一層タイプ(P+UV 樹脂塗工)」は、ほぼこの破線と同等の張力で牽引できることがわかり、現場使用においても十分なキャプスタンウインチでの牽引力があり、問題ないとする。

試験の結果、開発ロープは、イザナス「一層タイプ」のような使用後のロープの硬化、細りはなく、軽く、油で汚れないなど、施工性は良好であった。

これまで行ったワイヤーロープとの性能比較試験においても開発ロープは良好な特性を示しており、開発した「動索用低摩耗複合スーパー繊維ロープ」が動索用ワイヤーロープの代替として実用できることを確認し、目標を達成することができた(図 45)。

外径14mm、強度100kNクラス (洋上風力用のみ外径28mm、強度530kN)

ロープ種類	ワイヤーロープ	一層タイプ	二層タイプ	
			地中ケーブル牽引用	洋上風力発電ケーブル牽引用
従来技術				
		イザナス	イザナス芯材+従来編組	
新技術			 比率 3:1	 比率 1:1
		ベクトラン, P+UV樹脂	ベクトラン芯材+複合編組(PET+IZ)	

: 今回開発品

図 45 従来技術ロープと新技術ロープのまとめ

## 最終章 全体総括

### 3-1 アドバイザーによる講評(令和7年3月時点)

機関名・役職・氏名	講評・助言など
国立研究開発法人産業技術総合研究所 製造技術研究部門 トライボロジー研究グループ グループ長 是永 敦 主任研究員 中野 美紀 主任研究員 間野 大樹 ※3名の方が意見を出し合い、集約	主に委員会へ参加、トライボロジー(摩耗摩擦)の専門家として技術的な助言をいただいた。 ・基本原理とメカニズムを解明して開発を進めて欲しい。 ・ロープの使用方法に合わせた摩擦評価がされている。 ・牽引ロープは作業用であるため、フェールセーフを担保する必要がある。 ・様々な条件が絡むため、開発が難しかったと思う。 ・樹脂コーティングや構造を細かく検討していて良い。
株式会社関海事工業所 海洋本部 海洋部 工事課 主幹 関 聡	主に高木綱業が訪問し、使用者としての意見をいただいた。 ・スティックスリップは危険であるため、防止技術の開発を進めて欲しい。 ・開発ロープは深海開発にも用途の拡大が見込まれる。 ・シープ径は目標より小さくすることを目指してほしい。 ・洋上風力ケーブルの牽引用ロープの芯材は、一般的に水に浮くイザナス、ケーブルを揚陸する時にはベクトランと使い分けることも考えられる。 ・外層の編組は、キャプスタンでの巻取り実績から、ポリエステルとイザナスの混燃編組が良いと思われる。 ・ケーブル管路の摩耗が少ないロープがあれば良い。

<p>株式会社三友電工 統括本部長 湊 勝己</p>	<p>委員会への参加、高木綱業の訪問により使用者として意見をいただくとともに、キャプスタンウィンチの貸出や操作指導をいただいた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・開発目標が実現すれば施工性が格段に向上する。</li> <li>・使用基準、取換基準など定まれば、地中ケーブル張替工事現場で問題なく使用できる。</li> <li>・事業終了後も、実際のケーブル工事現場での使用についてできる範囲で協力したい。</li> <li>・使用している中で、どのような点検をすればよいのか、どの段階で取替えが必要なのか等の指針を示して欲しい。</li> </ul>
<p>三井物産プラスチック株式会社 四国支店マネージャー 前田 晋吾</p>	<p>主に委員会へ参加、原材料を供給する立場から助言をいただいた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・樹脂でのコーティングは興味深い。樹脂による性能の違いを認識することができた。</li> <li>・フッ素は環境問題が課題であり、シリコンは扱いが難しく高価なため、ポリエチレン系のコーティングが有望という結果となり良かった。</li> </ul>
<p>清水建設株式会社 エンジニアリング事業本部 新エネルギーエンジニアリング事業部 事業部長 白枝 哲次</p>	<p>主に委員会へ参加、使用者、設計者としての意見をいただいた。また、風力発電装置の大型化といった市場動向と清水建設の所有している SEP 船(風力発電装置の作業船)、風力発電の建設工事例について紹介いただいた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・海洋開発の際に牽引ロープの切断を経験したが、この開発が実現すればその不安が解消できる。</li> <li>・海洋工事においては、ワイヤーが途中で切れると、その後の工事ができなくなることにつながるため、ロープの耐久性が重要である。</li> <li>・使用条件をしっかりと定める必要がある。</li> <li>・洋上風力ケーブルで 30～70kN 程度と聞いたが、実際には、もう少し上の張力を想定しなければならない。</li> <li>・ロープを使用し、曲がった管路の中を確実に通すことができれば、工事のコストを下げることができる。</li> <li>・曲がっている長距離の管路に対して信頼性をもってケーブルを通すことができるのであれば、非常にメリットがあると思う。</li> <li>・初めて使用する際に、確実に切れないことが求められるため、安全率が非常に気になる場所である。</li> <li>・耐疲労性能はどういった数値になるのか、取扱い基準の設定の根拠として確認したい。</li> <li>・様々な情報をどのように処理するのかという段階に来ている。</li> <li>・一層タイプと二層タイプの各用途を明確な数値で示す必要がある。</li> <li>・芯材との滑りは、なぜそれが問題にならなくなったのか理由を整理し、断言できるようにして欲しい。</li> </ul>

### **3-2 3年度の研究開発成果**

全ての項目について、採択時の計画通り研究開発を実施し、目標値を達成した。

#### **【1】摩耗低減技術の開発**

従来のスーパー繊維ロープに対してロープ本体の摩耗 50%低減かつ、  
ワイヤーロープに対して接触物の摩耗 1/5

##### **【1-1】高耐摩耗繊維の選定**

従来のスーパー繊維組紐に対して組紐本体の摩耗 30%低減

##### **【1-2】摩耗低減構造の開発**

従来のスーパー繊維ロープに対してロープ本体の摩耗 40%低減

##### **【1-3】コーティング樹脂の開発**

従来のスーパー繊維ロープに対してロープ本体の摩耗 50%低減

##### **【1-4】摩耗低減性能の評価**

ロープ本体及び接触物の摩耗低減最終目標値達成を確認

#### **【2】摩擦制御技術の開発**

ウインチ巻取り時のスティックスリップ振動なし

##### **【2-1】スティックスリップ振動の解明**

スティックスリップ振動の発生条件解明

##### **【2-2】スティックスリップ振動防止対策の開発**

スティックスリップ振動の防止対策完成

#### **【3】取扱基準の設定**

安全率  $SF$ =ワイヤーロープと同等 シーブ径比率  $D/d$ =ワイヤーロープの  $3/4$

##### **【3-1】各種性能試験の実施**

ワイヤーロープとの性能比較の明確化

##### **【3-2】取扱基準の設定**

取扱基準の設定

##### **【3-3】総合性能評価**

動索用ワイヤーロープの代替可能

### **3-3 研究開発後の課題**

実際にロープを現場で安全に使用するためには、安全率や  $D/d$  だけでなく、点検方法、廃棄基準、保管方法などを定める必要がある。今回の研究開発において一部案を示したが、実際の現場での使用実績と評価を踏まえて、早期に改訂し推奨する必要がある。

### 3-4 事業化展開

#### ◆知的財産

「二層タイプ(複合編組)」ロープは、樹脂製のケーブル管路(エフレックス管)の摩耗が抑制可能となることから、市場動向を見極めて出願の可否を検討する。

#### ◆サンプル出荷・共同研究など

##### (サンプル出荷)

地中ケーブル張替現場での使用許可が得られれば、本事業のアドバイザーである三友電工殿に開発ロープをサンプル出荷し、施工性と使用後のロープの残存強度、損傷状況等の評価を行う。

洋上風力発電用ケーブル敷設現場では、本事業のアドバイザーである関海事工業所へサンプル出荷を行っている。今後は、使用後のロープの点検を行い、改良すべき点を把握し改良を進める予定である(図46)。

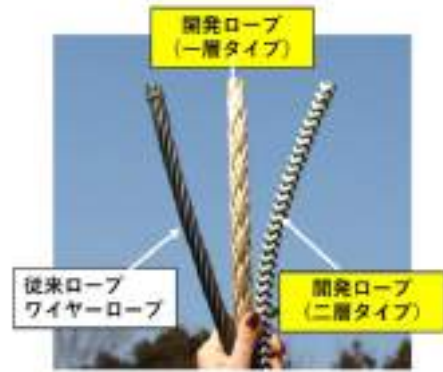


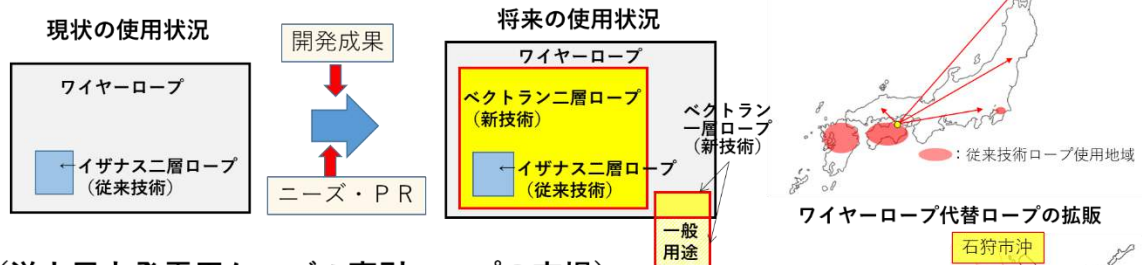
図 46 従来ロープと開発ロープ

##### (販路開拓)

展示会に積極的に出展しPRを進めるとともに、施工会社に破断試験などに立ち会ってもらい開発ロープの優位性の理解増進に努め、拡販を進める。

地中ケーブル、洋上風力ケーブル牽引用とも、繊維ロープの使用は始まったばかりであり、今後、ワイヤロープのシェアを繊維ロープに置き換えるべく、営業活動を進める(図47)。

##### (地中ケーブル牽引用ロープの市場)



##### (洋上風力発電用ケーブル牽引ロープの市場)

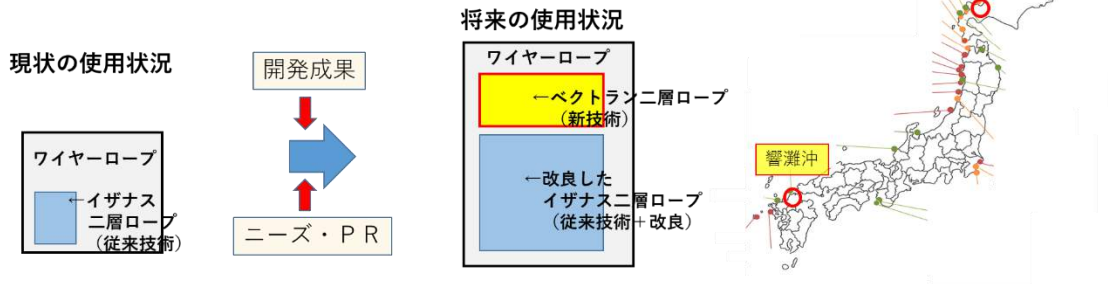


図 47 市場拡大のイメージ

以上