

船舶係留ロープのための繊維





海運セクターはかつてない活況を呈しています。それに伴い、新しい規制要件、高い安全基準、コスト圧力、ますます大型化する船舶など、今日の海運業界が直面する課題はさまざまです。さらに港湾施設運用の効率化を迫られ、係留オペレーションを迅速かつ安全、スムーズに行うプレッシャーは高まるばかりです。

こうした環境にあって係留作業の安全性と効率に、業界全体からの注目が集まっています。DSMはダイニーマ® SK78の製造を通じ、またOCIMF MEG4ガイドラインの開発に関わることで、現代の海運業界の課題に応える係留ロープ開発に、重要な役割を果たしています。

係留ロープの繊維を選ぶ 6つのポイント

この文書では、係留ロープに適した繊維を選ぶために考慮すべき主なポイントと、ダイニーマ® SK78 が一番の選択肢である理由を検証します。

1. 引張疲労
2. 耐摩耗性
3. クリープ寿命
4. 高温及び低温における性能
5. 環境負荷の低さ
6. 品質、認証、コンプライアンス

超高分子量ポリエチレン (HMPE) 繊維ベースの係留ロープは、係留をより速く行うことができ、人間工学にも優れています。しかしその中でも、使用開始したその日から継続して高い信頼性を保ち、耐用年数に優れてい

るのは、ダイニーマ® SK78の繊維で作られたロープだけです。これはダイニーマ® SK78の素材であるHMPE繊維が、繊維ロープの主な破損メカニズムを克服する特長を備えるよう、設計されているためです。

ダイニーマ® SK78は、引張疲労、耐摩耗性、クリープ寿命、高温及び低温における性能、低環境負荷のいずれにも優れています。その結果が、信頼性と耐用年数に優れた繊維です。過酷な条件下でもコスト効果に優れ、安全で効率よく係留が行える安心感をオペレーターに与えます。

適切な繊維の選択は、優れた係留ロープ性能への第一歩です。そして同じように重要なのが、安全性と耐用年数を強化したデザインとサービス体制を用意することです。ダイニーマ® SK78を使ってプレミアム繊維ロープを製造するパートナー企業は、軽量で耐用性に優れ、強く安全な係留ロープ作りに熱意を持って取り組んでおり、何年にも渡って性能を維持して行くための総合的なメンテナンスとサービスを提供しています。

1. 引張疲労

係留は複雑な作業であり、時として船舶の安全を確保するロープに過酷な摩擦やひずみをかけることがあります。風、波、海流、通過船などにより、船舶は入港中でさえ常に動いています。すなわち、係留ロープにかかる張力もまた常に変化し、素材疲労耐用年数の減少の原因になっています。また、連続的な糸や撚糸の擦れ合い、索道器内部などで曲げ角度の変化にさらされることにも影響を受けます。



- DSMの技術力により、ダイニーマ® SK78 繊維は繊維とロープの両方の状態で、一般のHMPE繊維の3倍の耐用年数を実現しています。
- さらに、正確な疲労モデリングにより係留ロープの寿命を予測し、目的の用途に対してダイニーマ® SK78が適した繊維である理由を実証しています。

モデリングと試験

ロープ性能を深く理解することは、安全性の大幅な向上につながります。DSMでは、疲労寿命予測のための正確なモデルを開発しました。ダイニーマ®SK78を使った係留ロープは、繰り返し荷重のもとでモデリングされており、ロープ耐用年数をより正確に予測できます。これはつまり破損の可能性が低くなり、係留の安全性が高まるということです。

ダイニーマ® SK78を使ったロープはまた、DSM、顧客、パートナー企業、外部機関のストレステストをすべて完了しています。モデリングに際しては次のパラメーターが考慮されています: ロープ構造、最小限破壊荷重、使用期間、海象データ。



(a)



(b)

図1.

(a) チューブオープンを使ったロープの引張疲労試験 (b) 巻き上げクランプ

2. 耐摩耗性

係留ロープは強い摩擦にさらされるため、耐久性が極めて重要です。ダイニーマ® SK78は、耐摩耗性が必須とされる多様な用途や条件下で使用されています。被覆のないロープ、あるいは被覆ロープのカバーとして使用する場合も、ダイニーマ® SK78は優れた耐摩耗性を発揮します。ほとんどの用途において、DSM独自の耐摩耗性コーティングの使用により、外部と内部両方の耐摩耗性をさらに強めることができます。

係留ロープの設計において耐摩耗性を最大化するためには、まず正しい繊維を選ぶことが重要です。しかしながら、HMPE繊維の耐摩耗性を評価するのは容易ではありません。繊維の中には、六角鋼や糸同士の摩耗テストで並外れた結果を出すものがあります。でもこうしたテストは、必ずしも実使用におけるロープの性能を示すものではありません。

- DSMは最高の耐摩耗性を持つ繊維を実現するため、現実的な条件下でロープをテストするための設備や方法に、多大な投資をしています。
- ダイニーマ® SK78を使用したロープの耐摩耗性は、一般のHMPEを使ったロープに比べ最大4倍も優れています。
- またこの耐摩耗性を、DSM独自のコーティングによってさらに高めることができます。

索動器内の摩耗

ダイニーマ®繊維は一般のHMPE繊維に比べ、耐摩耗性に優れています。破断サイクル数で測定した場合、ダイニーマ® SK78の持続期間は荷重条件により最大4倍となっています。

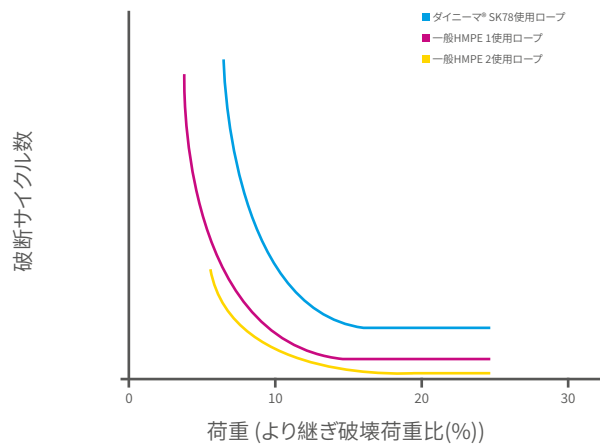


図2. ダイニーマ®SK78対一般HMPEの索道器摩耗性能比較

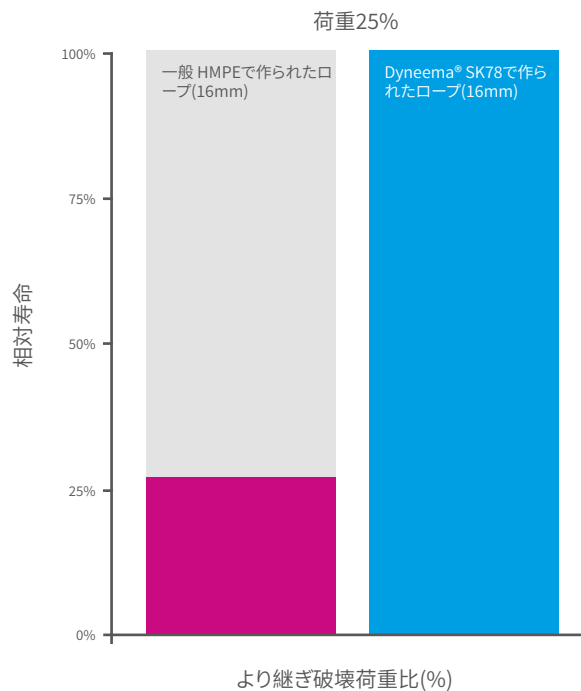


図3. ダイニーマ® SK78を使ったロープの耐摩耗性は、一般のHMPEの4倍

DSMのコーティングがさらに性能を向上

DSMはロープ製造者が追加できるコーティング、ICO-DYN 22を開発しました。コーティングは索道器の表面など、粗面に起因する外部摩耗からロープを保護するようにデザインされており、係留において最大3.5倍まで性能を向上し、信頼性を保ちながら寿命を延ばします。

保護効果が極めて高く、極度の接点や圧点にさらされる高性能ロープの耐用年数を劇的に延ばします。このため、最も経済的な選択とも言えます。

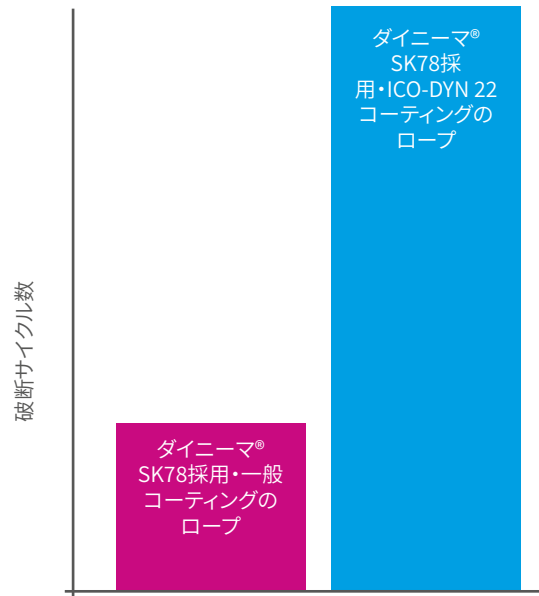


図4. ダイニーマ®SK78採用ロープを強化するコーティングで、索道器での摩耗性能が向上

モデリングと試験

DSMではロープ摩耗試験専用機を設計製造しました。この機械を使って外部の摩耗を評価し、巻き上げ、持ち上げ、係留における繊維性能の向上に使用します。この試験では、鋭角が摩耗率に与える影響、巻き上げのイン

パクト、そして特に係留ロープに重要である、索動器による擦れによる摩耗の影響を、モジュラー試験用表面を使って計測します。

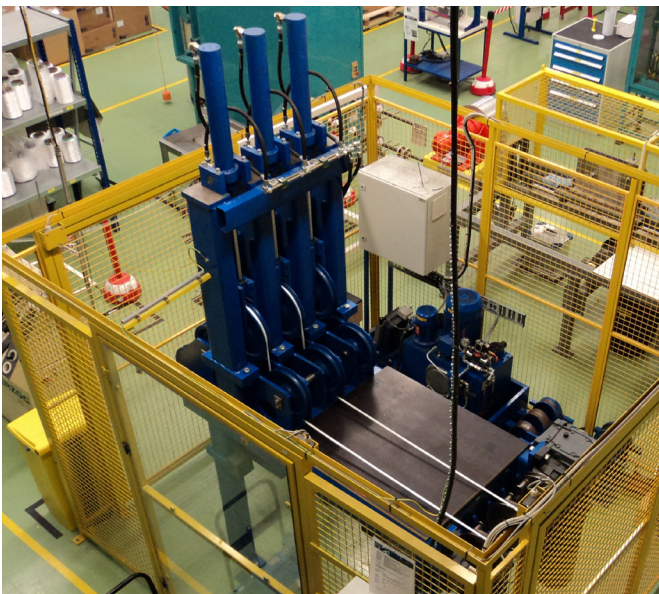
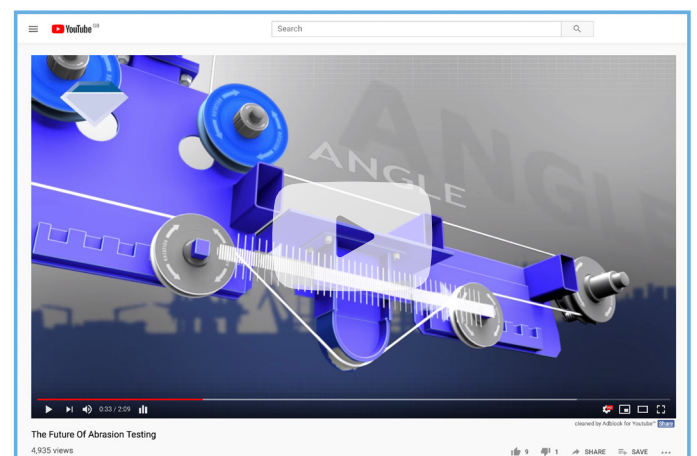


図6. DSM ダイニーマ テックセンターの摩耗検査機

ビデオ「摩耗試験の未来」をご覧ください: <https://www.youtube.com/watch?v=kDOJbhFUrkh>



3. クリープ寿命

HMPE繊維は全て、長期的負荷の影響を受けます。つまり時間が経つにつれ、HMPEでできたロープは伸びていくのです。これがクリープと呼ばれる現象です。長い分子鎖が相互に滑り、やがてロープの寿命を縮めます。

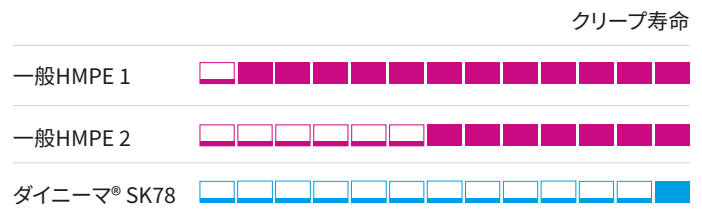
クリープ現象はあらゆる合成繊維に見られますが、中でもHMPEに顕著です。係留ロープのクリープ率は、例えば中近東で見られるように、高温条件下で使用すると高まります。このため長期に渡ってロープ性能を正確に予測できることが、特に重要になります。

- ・ DSMの技術力により、ダイニーマ® SK78 繊維は繊維とロープのいずれの状態でも、一般のHMPE繊維に比べ、最大4倍のクリープ寿命性能を実現しています。
- ・ さらに、正確なクリープ寿命性能モデリングによりクリープ性能を予測し、目的の用途に対してダイニーマ® SK78が適した繊維である理由を実証しています。

HMPE繊維のクリープは、繊維の種類、気温、負荷荷重によって影響を受けます。極端な高荷重や高温は、クリープの過程を加速します。しかしながらHMPEロープをいつ廃棄すべきかは、荷重、温度、ロープ荷重により異なります。またHMPE繊維の種類によって、クリープ抵抗や特徴も著しく異なります。その中でDSM製造の繊維は、クリープ率と重量が最も低くなっています。

クリープ寿命

ダイニーマ®で作られたロープのクリープ寿命は、一般のHMPEに比べ最大4倍となっています。



*同一荷重・気温下による

グラフ 1. クリープ寿命 ダイニーマ® SK78 対 一般HMPE

1990年代にHMPE繊維が商品化されて以来、DSMはお客様の用途に応じたクリープ予測の重要性を認識し、HMPE繊維のクリープ抵抗を支える不確定要素を特定するため、数年に渡り研究プログラムを実施してきました。その結果として開発されたのが、HMPEを使用するほとんどの用途において優れたクリープ性質を実現する、SK78繊維グレードです。

表1: 1,000kN BS (破壊強度索)におけるダイニーマ® SK78対一般HMPEの比較

繊維の種類	ロープ芯重量 (1000 kN BS)	クリープ荷重	温度	クリープ寿命
SK78	650 g/m	200kN	20°C	8年
その他HMPE				< 3年

モデリングと試験

DSMでは何年にも及ぶ研究プログラムを通じて、HMPEsの種類、温度、時間、張力など、複数のパラメーターを考慮したクリープ性能予測ツールを開発しました。このツールを使うことで、DSMはクリープ率と伸びを予測し、HMPE繊維を使った場合のクリープ寿命を予測することができます。

ビデオ「クリープを理解する」:

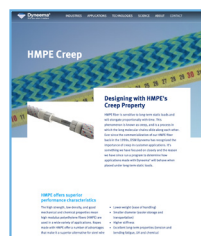
<https://www.youtube.com/watch?v=opPWceW-YKc>



をご覧ください。ダイニーマ® SK78 繊維でクリープ寿命を延ばすイノベーション

超低クリープHMPE繊維を作る難しさのひとつに、ポリマーの柔軟性に依存する製造過程そのものがあります。なぜならこの柔軟性のために、継続的な荷重による伸長(クリープ)が起きてしまうからです。

ダイニーマ® SK78の開発にあたり、私たちは製造過程でポリマーの柔軟性を保持しながら、使用時のクリープを削減する方法を見出しました。分子鎖を改造し、長い鎖が相互に大きくずれないようにすることで、これを実現しました。



詳細情報

HMPE クリープ:

www.dyneema.com/creep

表2. ダイニーマ®SK78採用のロープを使った船舶の、高気温での係留状況のシミュレーション結果

	LNG (液化天然ガス) 燃料船係留条件	
	ダイニーマ® SK78	
	1.5 kN/(g/m)	
ロープ強度	30°C	
24時間平均温度 (中東係留条件)		
	港内	露出
平均荷重	20% 破壊荷重 300 MPa	30% 破壊荷重 450 MPa
荷重振幅	5% 破壊荷重 75 MPa	20% 破壊荷重 300 MPa
暴露	500日	25日
相当応力(複合)	336 MPa	
予測クリープ寿命	632係留日	
計測クリープ寿命 (1回あたり3日の係留を1年あたり12回行った場合)	17.4 年	

* M. Vlasblom, R. Bosman, A. Gualdi, and J. Plaia, "Fundamental understanding of HMPE mooring rope endurance(HMPE係留ロープ耐久性の基本理解)" ODN 0967, OIPEEC Conference, The Hague, 2019.

4. 高温及び低温における性能

船舶は北極から中近東までいたるところに係留されており、ロープには幅広い気温に対応する性能が求められます。気温に加え、係留ロープが動いたり引っ張られたりすることにより内部に摩擦が引き起こされ、これによって熱が加わり、ロープ中心部の温度が上昇することがあります。どんな場所であっても、ロープの性能が持続することを、ユーザーは信頼できなければなりません。

HMPE繊維は優れた耐低温性が知られていますが、一般的に最大使用可能温度は比較的低いと言えます。このため、どのような気温下でもロープの性能を予測できることが重要となります。

- DSMが開発したロープ温度モデルでは、静的・動的な条件下でのロープ中心部の温度を正確に予測できます。ダイニーマ® SK78の特性と正確なモデリングにより、ダイニーマ SK78を採用したロープは高温でも一般のHMPEよりも安全に使用することができます。

ダイニーマ® SK78は高温、高荷重が条件となるさまざまな環境や用途に使われています。採掘装置、クレーンロープ、沖合施設など用途に関わらず、ダイニーマ® SK78は高温域での温度変動に耐性があります。使用開始のその日から信頼性を維持する、世界各地で最も信頼性の高い選択肢と言えます。

ダイニーマ® SK78は、予測リスクを削減すべく開発された正確なサポートモデルによって、高温に耐えるよう作られており、中東の大手船会社ですでに実績を積んでいます。



極低温度

湿度はダイニーマ® SK78の剛性や強度には影響を与えません。ダイニーマ®は極低温での使用に適しています。このためダイニーマ®繊維は、-162°Cでの液化ガス(LNG)移送用にも使われています。ダイニーマ®繊維で作られた係留ロープは、-40°Cでの試験を受けています(ヤマール、ロシア)。意図的にベンドを形成した場合でさえ、破壊強度は認証された等級よりも高い結果を示しました。

係留ロープ性能

ロープの破壊強度は70°Cまで、温度による影響を受けません。気温が上昇すると個々の繊維はやや強度を失いますが、ロープの強度が同様に劣化することはありません。

モデリングと試験

中東から北極まで、あらゆる環境条件下における温度性能挙動を正確に予測するための、モデル開発を行いました。

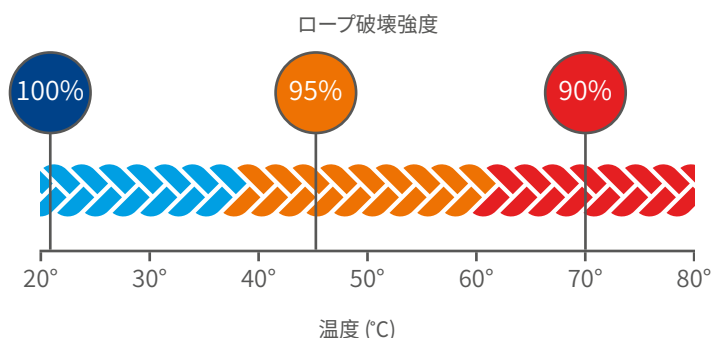


図5. ダイニーマ® SK78採用係留ロープの、高温での破壊強度(BS)

5. 環境負荷の低さ

DSMはサステナビリティを事業の核として推進しており、国連の持続可能な開発目標 (SDGs) にコミットしています。DSMのサステナビリティへのコミットメントはダウ・ジョーンズ サステナビリティ・インデックスやフォーチュン誌の「Change the World (世界を変える企業)」リストに取り上げられるほどであり、ダイニーマ®繊維製品の開発製造にも直接的に活かされています。ダイニーマ®の強度単位あたりの二酸化炭素排出量は、あらゆる高性能繊維の中で最低となっています。

ダイニーマ®繊維製造のおよそ95%は再生可能電力に基づいており、約16,500台の自動車の1年間の排出量に相当する二酸化炭素排出量を削減しています。ダイニーマ® SK78の使用は、二酸化炭素排出量の減少にも役立ちます。ダイニーマ®を係留に使うことで、一般

HMPE使用ロープに比べて削減できる二酸化炭素排出量は、最大20%にもなります。

ダイニーマ® SK78で作られた係留ロープは、次を実現します:

- 寿命が長く、船舶の耐用期間に渡って使用される材料を節約可能
- 係留時間を短縮
- 係留中に曳航の必要が少なく、オペレーションの費用を削減
- あらゆるHMPEの中で環境への影響が最小

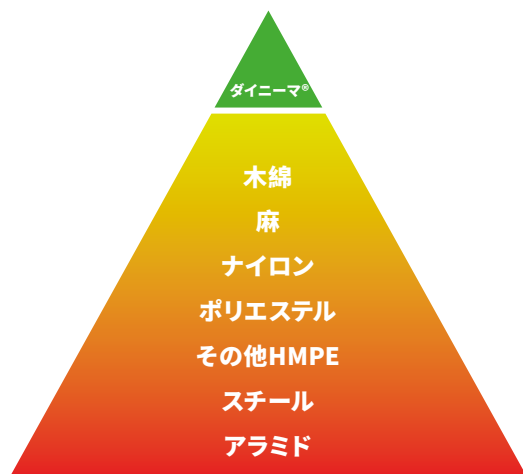


図6. ダイニーマ®

強度性能を元にして測定した場合、ダイニーマ®の二酸化炭素排出量は最低となっています。

より少ない量の材料で一定の性能を発揮することができるため、ダイニーマ®を使用した場合、単位強度あたりの二酸化炭素排出量は最低となります。

代替材料と二酸化炭素排出の節約量は用途により異なります。あらゆる用途において、ダイニーマ®は最高の強度を約束します。特定の用途における環境インパクトのアセスメントをご希望される場合は、当社までご連絡ください。

6. 製造、認証、規制コンプライアンスの一貫性

ダイニーマ®SK78はDNV GL、ビューローベリタス、ClassNK等の認証機関の認証を受けています。これは当社繊維の高性能と信頼性をさらに裏付けるものです。さらに、当社のプレミアム繊維ロープのパートナーは、MEG4のガイダンスに従い、ダイニーマ® SK78を使った耐久性に優れた強く安全な係留牽引ロープ作りに取り組んでいます。

DSMは次の認証を受けています:

- DNV GL 繊維製造認証
- DNV GL技術資格認定: クリープ性能ツール
- ビューローベリタス 係留タイプ認証ロープ繊維
- ClassNK 認証



係留ロープ用繊維のナンバー1

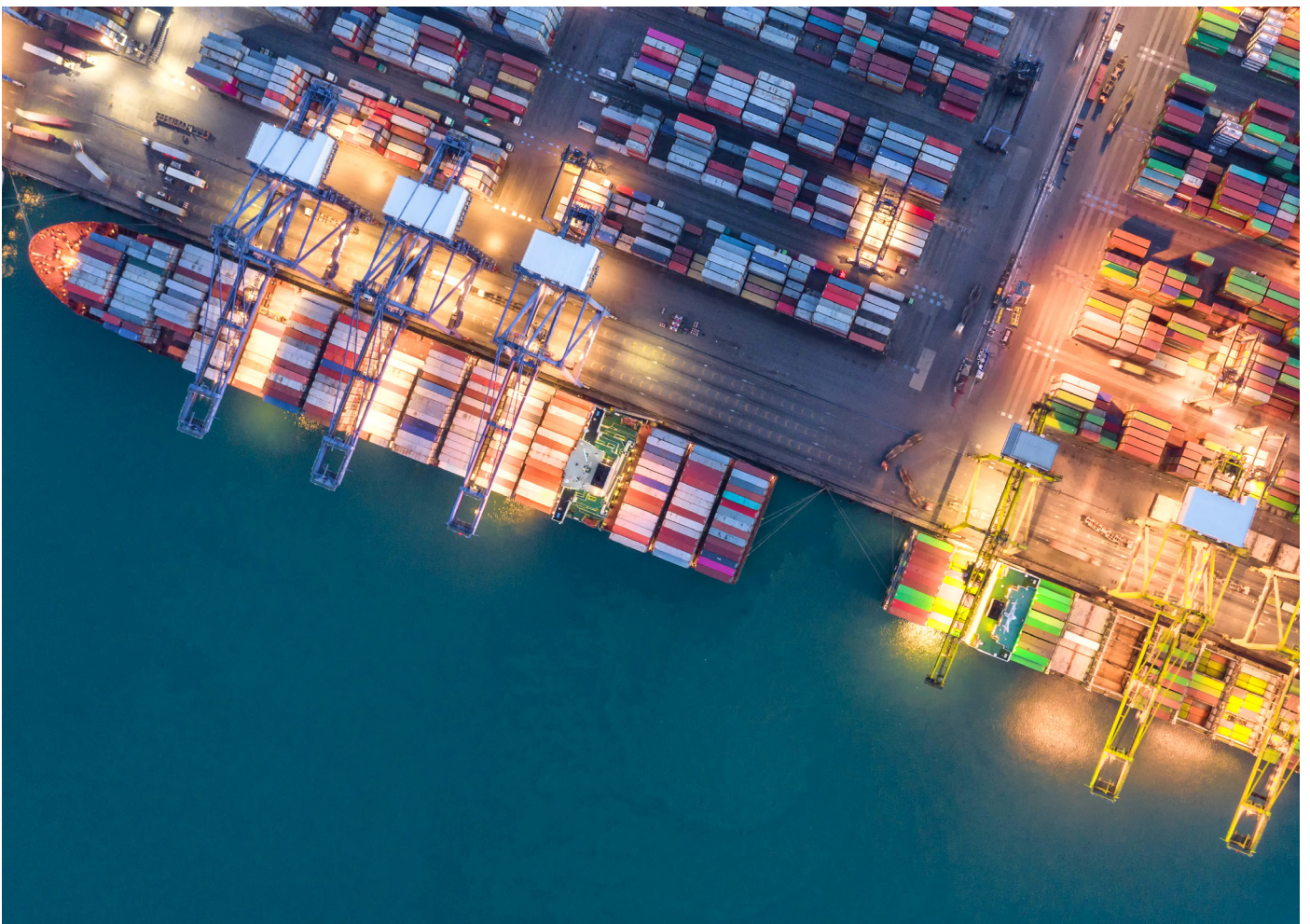
引張疲労、クリープ性能、耐摩耗性、高温及び低温における性能、環境負荷軽減のすべてに優れるダイニーマ® SK78は、名実ともに係留ロープ用繊維のナンバー1です。

適切な設計に加え、当社のプレミアム繊維ロープパートナーが強力なメンテナンス&サービスでしっかりとサポート。ダイニーマ® SK78は、最高の信頼性と、安全で効率的なオペレーションを行うために欠かせない安心感をお届けします。

プレミアム繊維パートナーと共に、DMSは、係留の安全性と優れたオペレーションの開発の中心となって尽力しています。ダイニーマ® SK78で作られた係留ロープは、公式ダイニーマ®ライセンサーからご購入ください。強く丈夫で安全な係留・曳航ロープを確実に入手できるだけでなく、何年にも渡って性能を維持するためのサービス&メンテナンス一括パッケージをご利用いただけます。

ダイニーマ® SK78やDM20等のダイニーマ®繊維は、海運、オフショア、重量物吊り上げなど、幅広い重工業用製品に使用されています。

繊維ソリューションと製品について詳しくは、[当社専門家までご連絡ください](#)。



ダイニーマ® SK78の特長 まとめ

ダイニーマ® SK78の繊維で作られたロープは、どんなHMPE（超高分子量ポリエチレン）よりも、使用開始のその日から継続して高い信頼性を保ち、耐用年数に優れています。

- 一般のHMPEに比べ、疲労寿命は最低でも3倍ダイニーマ® SK78は使用開始のその日からどんなHMPEよりも高い信頼性を提供します。
- 一般HMPE繊維と比べ、クリープ寿命は最大4倍
- 一般HMPE繊維と比べ、ロープ摩耗寿命は最大4倍
- 高温に耐えるよう設計された唯一のHMPE繊維
- DSM独自のモデリング技術により、さまざまな条件下でのダイニーマ® SK78の寿命を正確に予測
- あらゆる高性能繊維の中で、単位強度あたりの二酸化炭素排出量はダイニーマ®が最低
- ダイニーマ® SK78はDNV GL、ビューローベリタス、ClassNKの認証済
- ダイニーマ® SK78を使用した係留ロープは全OCIMF / MEG4 検査に合格

www.dyneema.com

Dyneema® および Dyneema®, the world's strongest fiber™ (ダイニーマ、世界最強の繊維) は DSM の商標です。厳密な承認を得た場合を除き、これらの商標の使用は禁じられています。

免責事項

DSM ダイニーマ製品に関連する情報、データ、推薦事項等(「以下情報」)は、全てリサーチによる裏付けを得ています。DSM ダイニーマは、購買者による(i)応用、加工または情報や製品を使って作られた使用法; (ii) 情報または製品の応用、加工または使用を理由とした、使用第三者の知的財産もしくは工業所有権の侵害から生じるいかなる責任も負いません。購買者は (i) こうした責任を想定し; (ii) 情報および製品を検証することとします。

Version 1.1 October 2019