



温暖な気候とダイナミックな条件での係留索の性能

アレッサンドロ・グアルディ¹, ピーター・ルーズモンド¹, ジム・プレア², ジャック・スパイカーズ¹, クリス・ヴォルペンハイ²

¹ DSM ² サムソン・ロープ・テクノロジーズ

海事分野はこれまでになく急速に進歩しています。新たな規制要件、より高い安全基準、コスト圧力、船舶の大型化などは、オペレーターが現在直面している課題のほんの一部です。船舶の大型化、ターミナルの露出、急激な気候変動などにより、係留索は荷重と温度の両面で過酷な条件にさらされることが多くなっています。

概要

- DSMとサムソン・ロープ・テクノロジーズは、ロープが動的な負荷条件を受けるあらゆる状況下で、ロープの温度を予測するモデルを共同開発しました。
- 第一原理に基づいたこのモデルは、実験データで検証され、幅広い条件で正確な予測が可能であることが示されました。
- この温度モデルとDSMの性能モデルを組み合わせることで、係留索の寿命をこれまで以上に正確に予測することができます。
- DSMとサムソン・ロープ・テクノロジーズは、ロープが動的な負荷条件を受けるあらゆる状況下で、ロープの温度を予測するモデルを共同開発しました。
- 一般的な事例では、中近東と北欧を往復するLNG船でのSK78の係留線の寿命は、年間480係留時間で計算すると15年以上になります。
- 同じ事例で、一般的なHMPEを使用した同等のロープで計算すると、5~8年の寿命となります。

はじめに

HMPE製の係留索の使用は、この数年で成長してきました。人為的なミス、最適でないロープ構造、システム全体の設計による初期不良は大幅に減少しました。現在では、適切なメンテナンスとHMPE繊維の種類の特性によって、ロープ寿命が大きく左右されるようになってきました。ダイネーマ®を使用した係留索は、世界中で使用されており、熱帯環境や寒冷地、穏やかな係留条件、そして最近では露出したターミナルでも使用されています。世界的な気温の上昇や船舶の大型化に伴い、（疲労）荷重条件とそれがロープの残存寿命に与える影響を見極めることがますます重要になってきています。

この資料では、DSMとサムソン・ロープ・テクノロジーズが共同で開発した、あらゆる環境温度で引っ張り疲労を受けるダイネーマ® SK78を用いた係留索の寿命を予測するツールを紹介しています。

ツール

このツールは、数値モデルをベースに、実験施設で得られた実データとエビデンス(1)を組み合わせたものです（図1）。ロープの温度は、ロープの構造、荷重条件、環境条件などにより計算することができます（図2）。

第一原理モデルに基づいて、粘弾性構成モデル(2)や摩擦係数などの材料特性に応じて、ロープヤーンのヒステリシスや内部スライドによる発熱を計算します。この熱の蓄積は、エネルギーバランス方程式(3,4)]を用いて計算された、ロープを介した伝導、環境への対流および放射による環境への熱損失と競合します。これらは、周囲の媒体（空気・水）や風や水流に左右されます。

ロープの温度が上がれば上がるほど、環境に熱が奪われていきます。その結果、ロープは通常、負荷による発熱と環境への熱損失が平衡する定常状態の温度に達します。定常時の温度は、高荷重、高頻度、ロープの径が大きくなるほど上昇します。逆に、環境温度が低かったり、風速が強かったり、編み込みピッチが大きかったりすると、定常温度は低くなります。

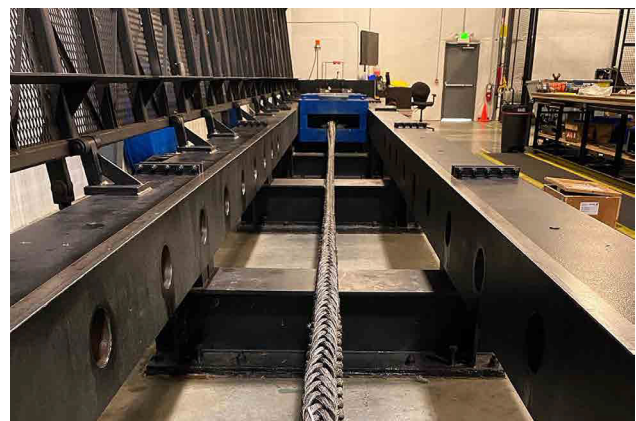
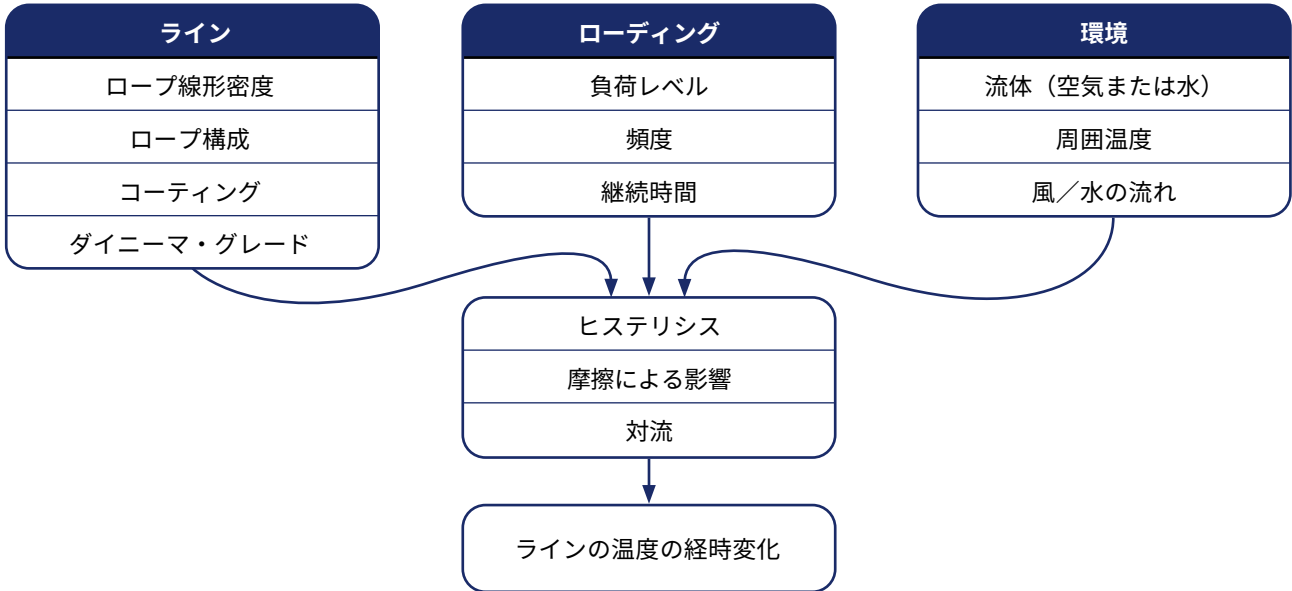


図1：サムソンの試験機器

このホワイトペーパーで紹介されているすべての結果は、同じ物理的パラメータで得られており、シナリオの違いは入力パラメータの違いによって表されています（図2参照）。物理的パラメータは、可能な限り文献や独自の特性評価の測定値から得たものです。熱伝導とヒステリシスによる発熱を微調整するためには、さらに2つのパラメータが必要でした。これらのパラメータは、5mmのロープを使った実験から決定し、その後、直径21mmと42mmのロープを使った結果を含め、他のすべてのデータポイントの計算に使用しました。

図2： DSMとサムソンが開発した係留索温度モデル



ロープの温度に関する考察

様々な条件で信頼性の高いツールが完成しました。また、ロープの断面全体の温度分布に関する洞察も得ることができます：このホワイトペーパーで紹介する最初の例では、ダイニーマ®SK78で作られた直径42mmのロープを、穏やかな係留条件でモデル化しています。周囲温度15°C、微風ロープは、設計破断荷重の1%（スラックに近似）から20%の間を12秒周期で荷重を繰り返します。

図3は、SK78を装着した42mmロープの定常状態での中心から芯（コア）までの引張疲労による温度分布を示したものです。芯の温度は周囲の温度に比べて11°C上昇し、表面の温度は8°C上昇します。芯と表面の温度差が3°Cもあるということは、ロープの外側で測った温度が芯の温度を予測するのに適しているということです。

さらに、厳しい条件の中でロープが高温になるまでの時間を調べました。

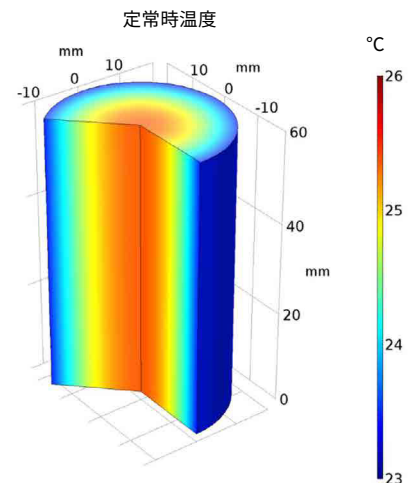


図3：ダイニーマ® SK78を使用した42mmロープの温度分布描写
環境温度15°Cで風速1m/s（1Bft）、周期12秒でスラックと20%MBLの間で繰り返し荷重させています。なお、試験終了後、直径は42mmから36mmになっています。

例えば、図4を見ると、直径42mmのダイネーマ®SK78を使用したロープを周囲温度15°Cで使用した場合、ロープのコアの最高温度が26°Cになるまでに約1.5時間かかることがシミュレーションで示されています。これは定常状態の温度であり、周囲の条件が変わらなければ、ロープ内部の発熱と周囲への熱損失が平衡していることを意味します。

直径28mmのロープの場合、定常状態に達するまでの時間は約45分です。同じ負荷条件（応力、振幅、周波数）であれば、ロープの直径が大きいほど、最終的な温度上昇が大きくなり、定常状態の温度に達するまでの時間が長くなることが確認されています。

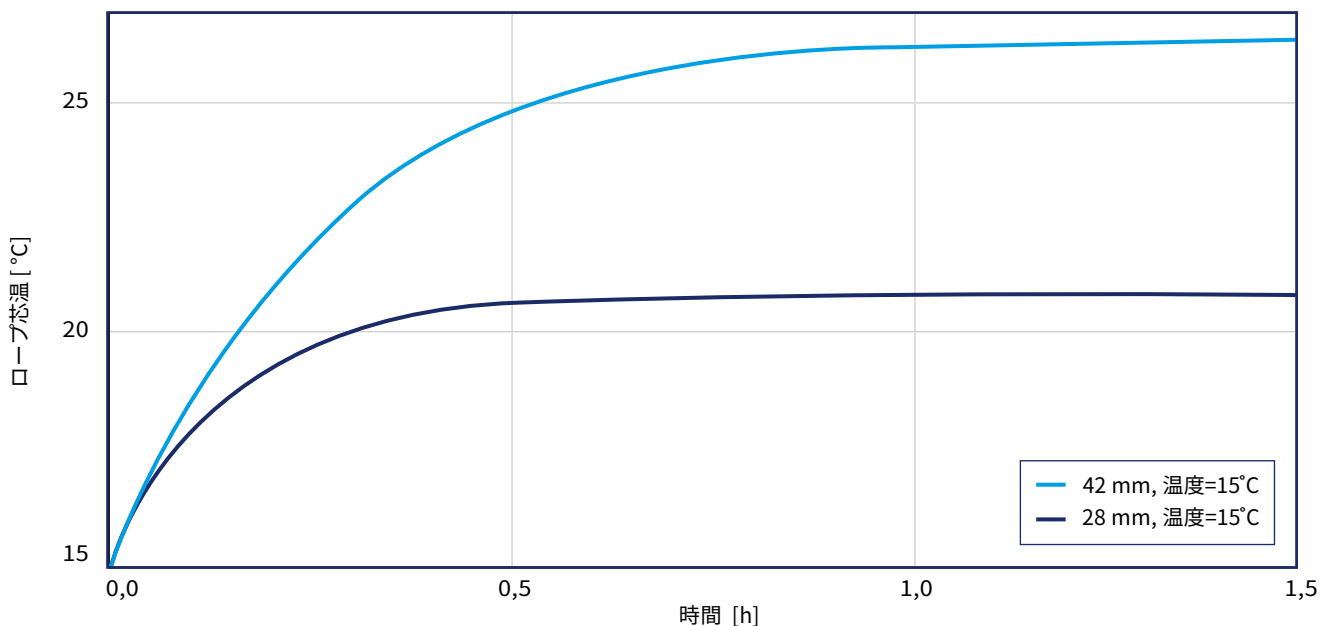


図4： SK78を使用した28mmと42mmのロープのコア温度の経時変化。定常状態では、コアの温度が定常状態になるまでに約1.5時間かかります。15°Cの環境下で、風速1m/s（1Bft）、12秒の周期で、ロープをスラックと20%MBLの間で繰り返し荷重させます。

信頼性の高いツール

実物大のロープを使った広範な検証の結果、この温度ツールが目的に対して十分すぎるほど正確であることが示されました。このことは、幅広い条件において、測定値と予測値のデータポイントの最大差が3°Cより大きいことからわかります（図6参照）。ここで重要なのは、すべての計算において、モデルのパラメータセットは同じものを使用したということです。前述のように、このモデルは第一原理に基づいており、熱伝導率と固有ヒステリシスに必要な調整のみ、5mmのロープを使った実験に基づいて決定しました。

21mmと42mmのロープの予測値はすべて第一原理計算によるものです。

この計算は、米国のサムソン・ロープ・テクノロジー、オランダのDSM マテリアル・サイエンス・センター、フランスのIFREMERの最新鋭の施設で行われた、幅広い条件での測定温度に非常に近いものでした。例えば、図5と図6の例では、実験と予測が比較されています。図5では、ロープの直径が温度に与える影響がはっきりとわかります。直径が大きいほど、ロープを冷却するための表面積に比べて、より多くの熱が発生するため、同じ条件での温度は、細いロープに比べて高くなります。さらに、新たに開発したツールによる予測と実験データが見事に一致していることがわかります。

実用的な使用例

ロープの温度モデルができたので、温度モデルとDSM(6,7,8)の定評ある性能モデルを組み合わせることで、様々な条件での係留索の寿命を予測できるようになりました。例として、中東と北欧を往復するLNG船の係留線を考えてみました。年間8回の往復で、それぞれの場所で30時間係留します(図7参照)。温度、風速、荷重の典型的な条件を表1に示します。この例では、毎年、北欧での係留中に嵐の状態に遭遇します。一方、中東では、年に一度、長期のうねりが発生することがあります。

表1には、これらの条件に対応するロープの温度計算値が示されています。算出された温度とDSM独自の性能モデルを組み合わせ、このような係留索の累積寿命を算出しました。ダイネーマ® SK78を使用したロープは、一般的なHMPEタイプに比べて疲労寿命が優れているため、厳しい環境下において最も長持ちする選択肢となります。

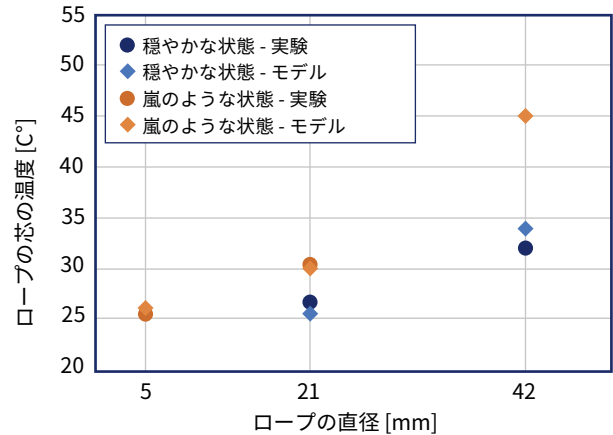


図5：ロープの芯の温度 荷重は、ゼロ（スラック）から最大破断荷重の27%（「穏やかな状態」）または40%（「嵐のような状態」）の間を約10秒かけて繰り返し荷重させた。

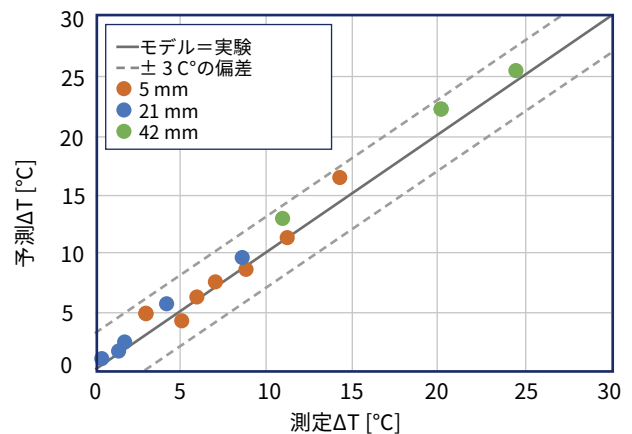


図6：ロープの直径、荷重レベルや頻度、周囲の温度や風速などの環境条件など、さまざまな条件での温度上昇の実測値とツールによる予測値の比較(図2参照)。ΔTは、ロープのコア温度と環境温度の差を表す。

	北欧の露出した港		中近東の港	
	良好な状態	嵐	通常の状態	長期のうねり
ロープの直径	42 mm			
コーティング	PURコーティング			
環境温度	15 °C		31 °C(日中)、22 °C(夜間)	
風速	0 m/s (BF 0)	10 m/s (BF 5)	0 m/s (BF 0)	0 m/s (BF 0)
プレロード (ロープの破断強度%)	15% BL	25% BL	15% BL	25% BL
負荷振幅	5% BL	20% BL	5% BL	10% BL
繰り返しインターバル	12秒	12秒	12秒	20秒
計算されたラインの 温度 (コア)	23 °C	42 °C	40 °C (日中) 30 °C (夜間)	51 °C (日中) 41 °C (夜間)
定常状態までの時間	90分	45分	90分	110分
ダイネーマ® SK78の寿命 ¹	15.9年			
ジェネリックHMPE 1寿命 ¹	5-6年			
ジェネリックHMPE 2寿命 ¹	7-8年			
発生状況	年間7回の係留、 1回30時間の係留	1年に1回の係留	年間7回の係留、 1回30時間の係留	1年に1回の係留

表1：42mmのHMPE製係留線の様々な条件での寿命予測、31°Cと22°Cはそれぞれ年間の平均的な昼間と夜間の気温
1 DSMのPerformance Model(6,7,8)を用いた計算と加速クリープ測定の見合わせに基づく

継続的な開発

疲労寿命を予測する信頼性の高いツールができたことで、DSMとサムソン・ロープ・テクノロジーは、より安全な係留作業を可能にする予測モデルと製品の開発を続けています。これらの開発の1つは、フェアリードのような外部表面に接触している係留索をモデル化するツールで、状況によっては表面の温度状態が上昇する可能性があります。

このモデルのプレビューを図7に示します。



図7：中近東と北欧を行き来するLNG船のケーススタディ。

直径42mmの係留索が、太陽で暖められて高温（60℃）になったフェアリードを表す長方形の金属ブロックに接触している様子をモデル化しています。このモデルでは、ロープの外周面の一部が金属面に直接接触する位置で温度が上昇することを示しています。また、ダイニーマ® SK78(5)の高い熱伝導率が熱源から素早く熱を伝導するため、温度上昇が熱源から数センチ離れただけで消失し、効果が局所的であることがわかりますその結果、フェアリードの影響は、ロープの中の約5mmの厚さの小さな部分に限られます。したがって、耐荷重性繊維の大部分は高温にさらされません。これは、以前の研究で発表された測定結果と定性的に一致しています(10)。

これに関連して、ダイニーマ® SK78を使用した係留索は、高温にさらされたダイニーマ® SK78繊維が冷却後に元の特性を取り戻すため、70℃(10,11)の温度でも安全に使用することができることも重要です。コアの温度が70℃でも永続的な影響はありません。負荷をかけたダイニーマ®が溶け始めるのは145℃(5)]であるため、短時間でこの温度を超えても問題はありません。次のステップとして、このホワイトペーパーで紹介されている疲労負荷モデルに外表面モデルを組み合わせる予定です。

係留のための第一の選択肢

係留索の性能は、適切な繊維の選択、ロープのコーティングと構造、係留索の設計、サービスとメンテナンスのパッケージによって決まります。暑い気候、多様な負荷条件、あるいはその両方の組み合わせなど、船舶のオペレーターが過酷な環境に直面した場合、このホワイトペーパーで紹介されているツールは、ダイニーマ® SK78で作られた係留索への信頼性を提供し、係留の安全性を高めるための提案を行うことができます。

ダイニーマ® SK78は、引張疲労性能、クリープ性能、耐摩耗性、高温・低温性能、環境負荷の低減などを兼ね備えており、船舶用係留索の繊維としてナンバーワンの選択となっています。

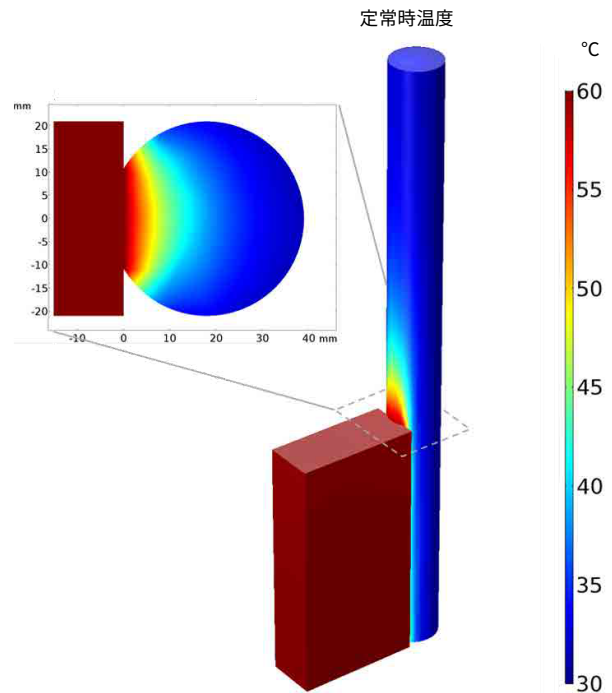


図7： 60℃で42mmの係留索を金属ブロックに接触させた場合のプロット。周囲温度： 30℃。ロープは局所的にブロックとほぼ同じ温度になりますが、ダイニーマSK78®の高い熱伝導率のおかげで、断面の大部分は影響を受けません。

DSMは、プレミアムファイバーロープのパートナーとともに、係留の安全性と優れた運用性の開発に力を注いでいます。適切な繊維を選ぶことは、適切な係留索を選ぶための重要なステップです。同様に重要なのは、適切な係留索のデザインを選択し、それに加えてメンテナンスやサービスパッケージを提供することです。サムソンは、ダイニーマ® SK78、独自のコーティング、異なる船型に合わせて最適化された構造を用いて、係留ソリューションを提供してきた実績があります。

係留索の選択プロセスを徹底的に行うことで、オペレーターは係留索の設置時に耐久性、強度、安全性を確保できるだけでなく、係留索の性能を毎年維持するためのツールやメンテナンスパッケージも確保することができます。

本稿では、SK78を使用したラインが、標準的な係留条件と過酷な係留条件の両方で、高温と負荷振幅の増加に対応して優れた性能を発揮することを明示しています。他のメーカーの繊維では、標準的な条件や悪化した条件でも同様の寿命性能を示すことはありません。

DSMでは、ダイネーマ® SK78やDM20をはじめ、海運、オフショア、重量物運搬などの様々な重工業用途に適したダイネーマ®繊維の幅広いポートフォリオを提供しています。繊維ソリューションの詳細については、当社のエキスパートにご相談ください。

参照

- (1) Fibre Rope Tensile Fatigue and its Applicability to Vessel Mooring: Performance Assessment and Suitability, G. Mozsgai and K. Volpenhein, OIPEEC 2017 Conference, La Rochelle, 2017
- (2) Deformation behavior of oriented UHMW-PE fibers, L.E. Govaert and P. Lemstra, Colloid & Polymer Science: 270(5):455-464, 1992
- (3) Fundamentals of Heat and Mass Transfer, F. Incropera, D. DeWitt, T. Bergman and A. Lavine, John Wiley & Sons, 2006.
- (4) Laminar free convection heat transfer from vertical cylinders, J. B. Cox, 1962.
- (5) Customer Information Sheet CIS YA 100: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber from DSM (2016)
- (6) Predicting the Creep Lifetime of HMPE Mooring Rope Applications, M. Vlasblom and R. Bosman, OCEANS 2006 Conference, Boston, 2006.
- (7) Fundamental understanding of HMPE mooring rope endurance, M. Vlasblom, R. Bosman, A. Gualdi, and J. Plaia, OIPEEC 2019 Conference, The Hague, 2019.
- (8) DSM Dyneema Performance Model, Technology Qualification status – performance model core equations, report.no.2019-3231, DNV GL, Vidar Ahjem, 2019-12-12.
- (9) Designing HMPE fiber ropes on durability, M. Vlasblom, R. Bosman, J. Canedo, and P. Davies, OCEANS 2019 Conference, Marseille, 2019.
- (10) Samson Technical Bulletin: Mooring in High-Temperature Climates, Samson, 2019. Available at https://www.samsonrope.com/docs/default-source/technical-bulletins/tb_tanker-mooring-in-hot-climates_sept2012_web.pdf?sfvrsn=b3bc442c_2
- (11) The manufacture, properties, and applications of high-strength, high-modulus polyethylene fibers. Martin Vlasblom, in: Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres (Second Edition), Woodhead Publishing, 2018



www.dyneema.com

ダイネーマ®およびダイニーマ®, 世界最強の繊維™はDSM社の商標です。これらの商標の使用は、厳密に許可されていない限り禁止されています。

免責事項

DSM保護材に関するすべての情報、データ、推奨事項など（以下、本情報）は、調査に基づいています。DSMプロテクティブマテリアルズは、(i)本情報または製品の適用、加工または使用、(ii)購入者による本情報または製品の適用、加工または使用を理由とした第三者の知的財産権または工業所有権の侵害に起因する責任を負いません。買い手は、(i)そのような責任を負い、(ii)情報と製品を確認するものとします。

バージョン1.0 2020年8月