

# ポリアリレート繊維を用いた高強度高分子ロープの引張強度特性評価

松尾 卓摩<sup>\*1</sup>, 田中 理紗子<sup>\*1</sup>, 斎藤 芳隆<sup>\*2</sup>, 秋田 大輔<sup>\*3</sup>, 中篠 恭一<sup>\*4</sup>, 後藤 健<sup>\*2</sup>

## Evaluation of tensile strength of high-strength polymer rope using polyarylate fibers

Takuma MATSUO<sup>\*1</sup>, Risako TANAKA<sup>\*1</sup>, Yoshitaka SAITO<sup>\*2</sup>  
Daisuke AKITA<sup>\*3</sup>, Kyoichi NAKASHINO<sup>\*4</sup> and Ken GOTO<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

The tensile strength of high-strength polymer rope using polyarylate fibers that is a promising candidate of a strength member of a super-pressure balloon was evaluated. The tensile test result shows that the strength of the rope was only 45 % of the bulk strength. Since the rope was formed by twisting two strands, which are twisted by themselves oppositely, it is considered to be due to structural degradation, for example, the outer parts are required more stretch than inner parts. Specimen ropes of various twist angle of strands without changing the twist angle of strands themselves were tested to find the influence of the twist angle on the break strength of the rope. Test result shows a slight degradation as the twisted angle becomes larger. Tensile strength of ropes including cross section of various cross angles were also evaluated. As the result, the strength decreased as the cross angle became larger. From the fracture surface observation, it was considered to be due to the friction of the contact part.

**Keywords:** Super-Pressure Balloon, Polyarylate fiber net, Tensile test, Fracture strength

### 概要

スーパープレッシャー気球（SPB）の部材として利用が期待されているポリアリレート繊維を用いた高強度高分子ロープの引張強度特性を評価した。その結果、ロープの引張強度はポリアリレート繊維のバルク材にくらべ45%の強度に留まることがわかった。これは、このロープが捩られた2本のストランドを逆方向に捩りあわせた構造を取っているため、たとえば、ロープの中心から遠い方が近い方と比べてより大きな伸びが要求されるといった構造的な原因による可能性が考えられる。そこで、ストランドの捩れを変化させず、捩り角のみを変化させたロープを用意し、引っ張り試験を実施したところ、捩り角を変化させると破断強度が変化し、特に、大きく捩り角を変化させた場合には強度が低下する傾向があることがわかった。また、網の交差部を有するロープの強度を評価した結果、交差角が大きくなるにつれて強度が低下した。破面観察により、接触部の摩擦によってロープが損傷するためと考えられた。

### 1. はじめに

現在、世界各国が人工衛星や観測ロケットの打ち上げを行い、実験を行っている。しかし、これらの開発や製作にかかる費用は高額である。そこで、コスト削減の案のひとつとして、観測装置を搭載した気球を高高度に長時間飛翔させる手段があり、小型観測ロケットや大型衛星と比較すると非常に

doi: 10.20637/JAXA-RR-18-011/0002

\* 平成30年12月19日受付 (Received December 19, 2018)

<sup>\*1</sup> 明治大学 理工学部機械工学科 (School of Science and Technology, Meiji University)

<sup>\*2</sup> 宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency)

<sup>\*3</sup> 東京工業大学 環境・社会理工学院 (School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology)

<sup>\*4</sup> 東海大学 工学部 (School of Engineering, Tokai University)

安価である[1]. そこで、長時間飛翔が可能な大気球を運用できれば、それまで行っていた地球周回衛星においての実験が低コストで可能となり、また新しい実験や成層圏大気のモニタリングによるデータを得られるため、多くの国で研究・開発が進められている。

長時間飛翔用大気球の開発は NASA では 1990 年代から高度 33 km に 1 t の観測装置を飛翔させることを目指して開始され、現在では、科学実験への適用が開始されている。現在開発が進められている長時間飛翔用気球の多くは内圧を大気圧より高く保つことができる体積変化のないスーパープレッシャー気球で、通常の気球と比較してバラストを搭載する必要が無く、飛翔時間がバラストの積載量に制限されないという大きい利点がある[2-5]。現在、我々が開発を行っているスーパープレッシャー気球の構造を図 1 に示す。気球皮膜に働く張力が子午線方向のみとなるオイラーの楕円形の回転形状をとり、ポリエチレンフィルム皮膜の上に高強度高分子材料を用いた菱目型ネットを被せる構造である[6]。この構造をもった気球は、2011 年に地上での原理実証試験において体積 9.3 m<sup>3</sup> の気球で耐圧性能 9,600 Pa が確認された。また、2012 年には体積 3,000 m<sup>3</sup> のスーパープレッシャー気球と体積 15,000 m<sup>3</sup> のゼロプレッシャー気球とのタンデム気球システムを飛翔させ、飛翔時の耐圧性能が 400 Pa あることが確認されている[7]。

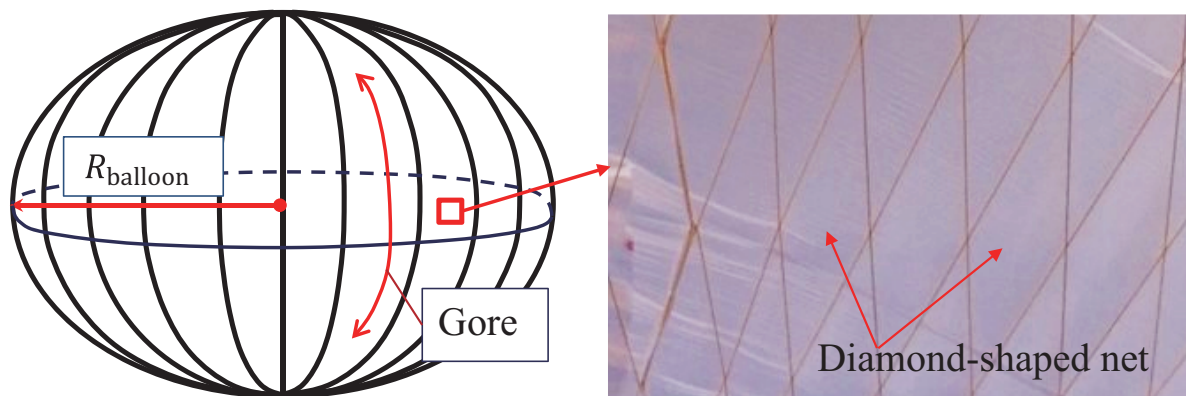


図 1 Structure of super-pressure balloon (left) and photograph of net used in this balloon (right). The balloon was made of gores.

本気球開発の最終的な目標としては、体積 300,000 m<sup>3</sup>、機器搭載量 1 t の気球を作製し上空 37 km の高度において観測を行うことであり、実用化に向けて地上膨張破壊実験が行われている。

現在のスーパープレッシャー気球で使用されている菱目型ネットは、軽量かつ高強度である高強度繊維の一つで、ネット材料として市販されているポリアリレート繊維を用いた物を使用してきた。これまで、ネットの強度についてはメーカーが提供する数値を基に破断強度を推定してきた。これらの強度はスーパープレッシャー気球で要求される強度としては十分であったが[8]、繊維の原糸の強度と比較すると低い値であった。また、室内試験において想定以下の負荷で気球が損傷したケースも発生していることから[9-13]、ロープ自体の力学的特性をより詳細に評価し、ロープの損傷により気球が破損するリスク要因について検討する必要がある。

そこで本研究では、ポリアリレート繊維ロープの力学的特性について、単軸引張試験によってあらためて強度を評価するとともに、ロープ形状の部材が原糸と比較して強度が低下する原因をロープに生じる応力状態や破壊メカニズムから推定する。また、ロープをネット形状にして使用した場合における強度の変化についても調査し、ポリアリレート繊維ロープをネット形状で使用した場合を想定して、2本のロープを交差させて網目部が存在する場合における強度についても評価する。

## 2. ロープ構造

本研究で使用するネットの構造の詳細を図2に示す。ロープはポリアリレート繊維を束ねたものを用いて作製されており、図2左図に示すように繊維を300本集めて束にしたストランドを撚り、2本のストランドを撚りあわせた撚り紐の構造となっている。また、ストランドのねじれによってロープの撚りが安定している。ネットは気球全体を覆うため、お互いのロープが、撚り合わせた2本のストランドの間を通る無結節網構造（図2右図）となっている[14]。

気球に被せるネットにはたらく張力の総和は式(1)のようになる。ただし、 $\Delta p$ は気球内圧、 $T_{rope}$ はロープ（網線）にはたらく張力、 $R_{balloon}$ は気球の赤道半径である。最終的に目標とする体積 $300,000 \text{ m}^3$ の気球が高度 $37 \text{ km}$ を飛翔する場合における要求耐圧は $100 \text{ Pa}$ である[15]。網線本数と内圧から算出した各気球における要求応力は、ロープ1本あたりに要求される荷重は $59 \text{ N}$ である[15]。ロープの各構成単位の直径を光学顕微鏡にて測定したところ、平均単繊維径は $25 \text{ }\mu\text{m}$ 、ストランド径は $623 \text{ }\mu\text{m}$ 、ロープ径は $966 \text{ }\mu\text{m}$ であった。ポリアリレート繊維は溶融紡糸法にて製造され、冷却時に外側の分子が配向したスキン-コア構造をもつ。また、バルク材の物性値は表1に示す値を使用した [10]。

$$T_{rope} = \pi(R_{balloon})^2 \Delta p \tag{1}$$

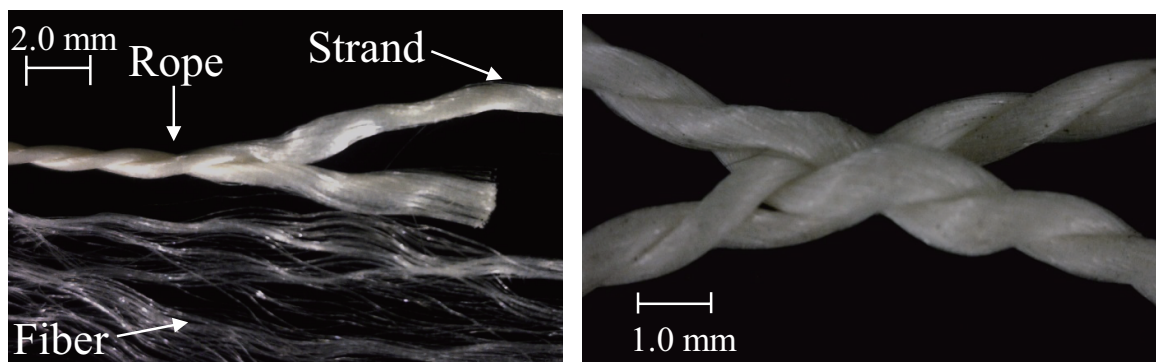


図 2 Structures of rope (left) and mesh of net (right) used in super-pressure balloon.

表 1 Physical properties of polyarylate fiber [10].

Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Tensile strength [GPa]	Young's modulus [GPa]
1.40	3.01	104.3

### 3. ロープ及び繊維の引張試験

#### 3.1. 単軸引張試験

初めに、引張試験可能な形状に加工したロープを用いて変位速度 $2 \text{ mm/min}$ で引張試験を行った。ロープのゲージ長は $30 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ とした。破断するまでの試験片の状態を観察したところ、図3に示すように引張荷重を受けることによりロープの撚り角 $\theta_{rope}$ が変化しロープ径は徐々に減少した。試験中のロープを撮影した画像から直径を測定し、ひずみとの関係を示したのが図4である。ここで、直径は画面上の最も幅の大きな部分を用い、また試験開始時の直径を1として正規化した。こういった測定を三回実施し、ひずみに対する直径の変化の関係を近似した式を求め、応力を補正した。なお、ここで求まる応力は、材料の純粋な伸びとロープの撚りが相乗されたものであるから、以後、「見かけ応力(apparent stress)」と表記することにする。

次に単繊維の引張試験を行った。試験片はネットから切り出したロープを分解した単繊維を用いた。試験片は天然繊維の引張試験方法[16]を参考に作成した。単繊維の両端を紙片に接着剤で固定し、これを引張試験機のかかみに挟み、紙片を切断して緩みを取り、 $1 \text{ mm/min}$ で引張試験を行った。変位測定にはレーザー変位計を用い、ゲージ長には試験機のかかみ部間距離を用いた。

単繊維とロープの引張試験結果を比較したものを図5に示す。なお、応力ひずみ曲線は、応力とひずみが最も平均値に近い一例を示した。なお、平均値はロープつかみ部で破断していない14本の試料の測定によるものである。図5左図がロープの荷重一伸び線図、中央が図4から直径を補正して見かけ応力を算出した応力一ひずみ線図、右図が単繊維、ロープの応力一ひずみ線図を単繊維の破断

時のひずみと表1のバルク材の引張強度の値[10][17]を基準に正規化したものである。また、表2に各試験における結果の平均を示す。単繊維の破断強度はバルク材の81%、ロープの強度はバルク材の45%であり単繊維に対して56%であった。ロープの強度は前述したスーパープレッシャー気球の要求強度である59Nには十分に耐える468N(7.9倍)であったため、スーパープレッシャー気球用ネット材料と想定している負荷は満たしているが、バルク材のカタログ値の半分程度の強度となっていた。また、結果のばらつきについても調べた結果、最も低い荷重で破断したものが327N、高い強度で576Nであった。一般的に繊維を撚り合わせた構造の材料では繊維長さが均一でないため、単繊維よりも引張強度が低下する傾向が見られる。しかし本研究で用いた繊維はゲージ長が短いため、繊維束内に存在する短い繊維の影響が少ないと考えられる。そのため、強度の低下には別のメカニズムが作用したと考えられる。

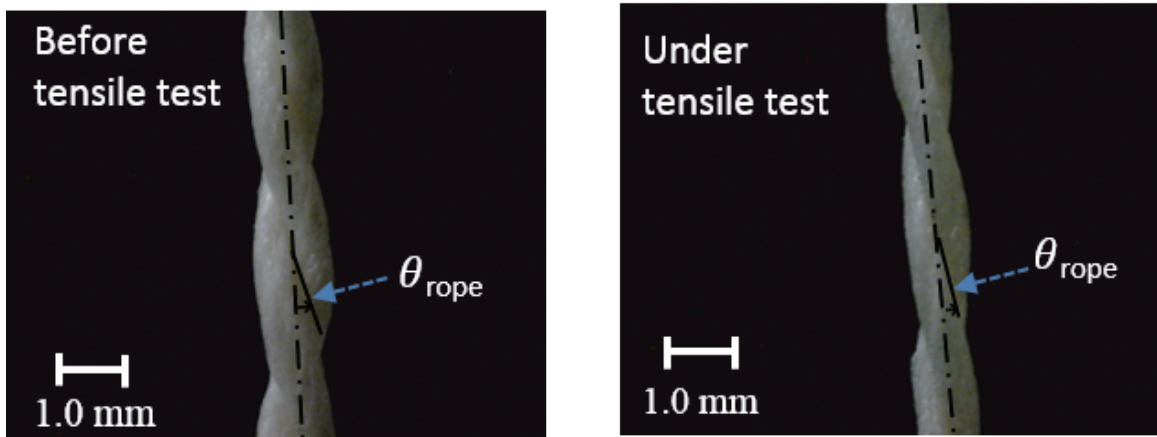


図3 Surface photographs of rope before tensile test (left) and during the test (right).

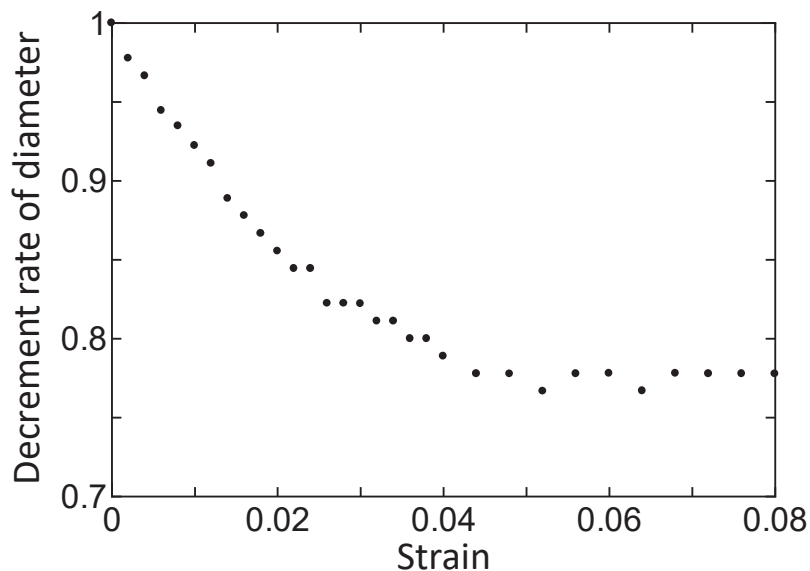


図4 Decrease in rope diameter during tensile test.

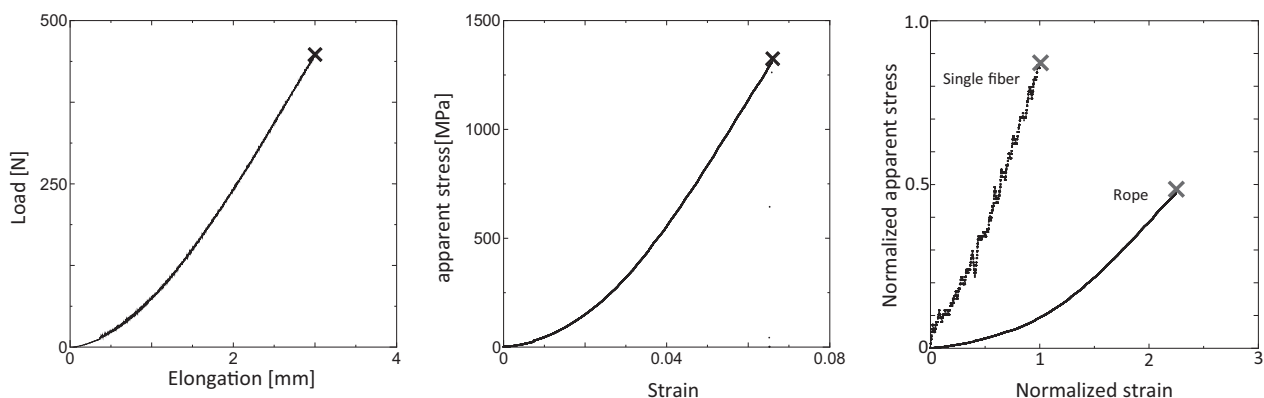


図 5 Load-elongation curve (left), apparent stress-strain curve of rope (center), and normalized stress-strain curve of the rope and single fiber (right).

表 2 Results of averaged tensile tests for each components

	Fiber	Rope
Tensile strength [GPa]	2.45	1.37
Fracture load [N]	1.2	468
Young's modulus [GPa]	88.3	28.3
Ratio to bulk specimen [%]	81	45

### 3.2. 撚り角度の影響

前節のロープや繊維の引張試験で得られた強度は、バルク材と強度と比較して低下していた。バルク材とロープ、繊維の大きな違いは構成する繊維の数とロープの撚り構造である。図3より引張試験時にロープは大きく変形し、その撚り角度が変化したことから、強度が低下した原因はロープの撚りにあると推測し、ロープの撚り角度を変えた実験を行い、撚りが強度に及ぼす影響を調べた。ロープの撚り角度は無負荷時を0°として、増加・減少の両方に変化させて試験を行った。引張速度は1 mm/minとし、標点距離には治具のつかみ部間隔を適用した。つかみ部で破断した結果は除いて角度と引張強度の相関を求めた。ロープの直径は図3の結果を用いて補正し、見かけ応力を算出した。撚り角度の変化量と破断強度の関係を図6に示す。なお、破断強度は図5右図のロープの引張強度を1として正規化した。また、図中の記号●、×はそれぞれ、無負荷時のロープの撚り角度を基準として、ロープに撚りを加えて撚り角を増加方向（時計回り）、減少方向（反時計回り）に変化させた結果である。撚り角度が増加、減少いずれの方向においてもわずかに撚りを加えた場合では強度に大きな変化が見られないが、2°～4°程度変化させると強度が増加し、さらに撚り量が増加すると強度が低下する傾向が見られた。

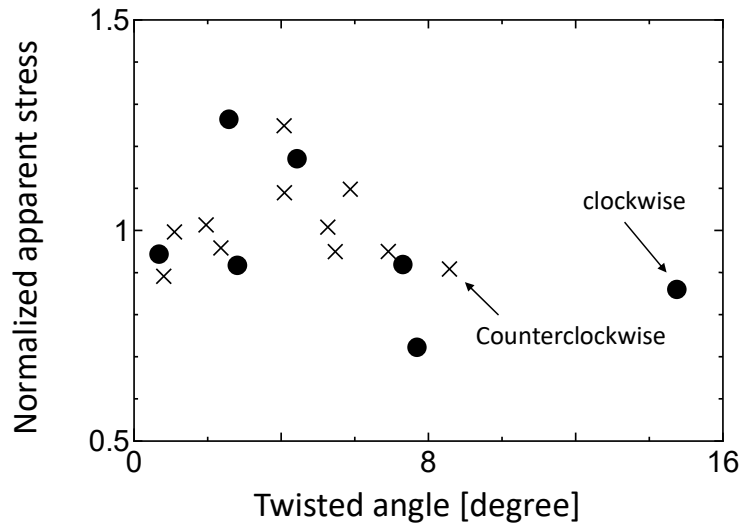


図 6 Change in normalized apparent stress as a function of twisted angle.

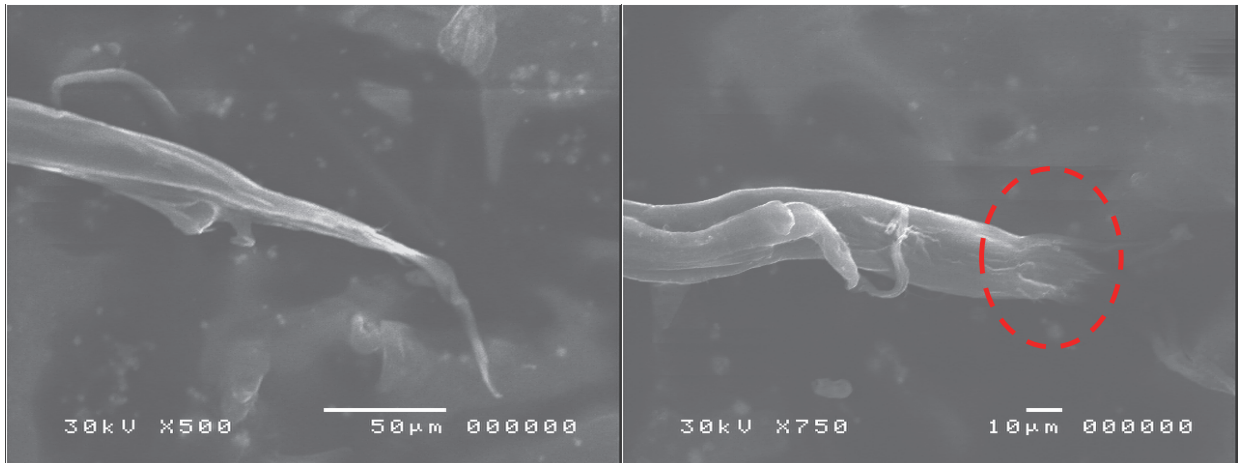


図 7 Fractured part of fiber at a test of a rope (left) and change of rope's twist angle (right).

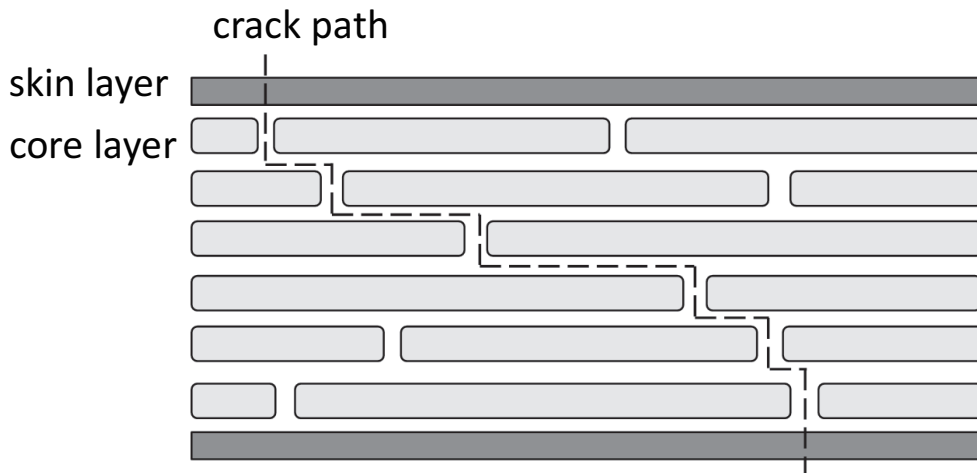


図 8 Illustration of crack propagation path in fiber.

次に、ロープ破面を観察した。図7左図に単繊維の引張試験後の破断面を示す。繊維は斜め方向に切断されており、先に向かって細い尾部が形成されている。図8に破断の模式図を示す。ポリアリレート繊維は前出の通り表層のスキン層と内部のコア層で構成される[10-13]。スキン層に生じたき裂は配向した分子の間を進展し、枝分かれしながら繊維を破断させたと予想される。そして、分子鎖の繊維方向の切断とすべりによる切断が同時に発生したため、図7左図のような破面となったと考えられる。また、ロープの引張試験において撚り角度を変化させない場合ではこの単繊維の破面と同じ形状の破面が多く観察された。一方、角度を変化させた場合では、図7右図のような斜め形状の尾部がかなり短い形状が確認できた。これは繊維にせん断方向に力が働き、分子が切断されたためであると考えられる。

また、撚り角度を増加方向に振ると、安定していたバランスが崩れる。撚り角度を増加させた場合では撚りが戻る方向の力、すなわち撚り戻り[18]のトルクのために素線がせん断力によって切断されることが考えられる。一方で、角度を減少させる方向に変化させると、より戻りのトルクの他に、ロープ外側の繊維は外へ膨れ内側の繊維はまっすぐに張られる状態となる。この状態で荷重を負荷すると、ロープ内側の繊維にのみ負荷される荷重の不均一状態が生じ、内側から破断したと考えられる。また、図6において $2^{\circ}$ ～ $4^{\circ}$ 程度撚りを変化させた場合、引張強度が向上する原因として、試験片作成時にロープを切断しているため試験片上下部分で撚りがばらついた状態となっており、より角度を調整することで全体的に均一な撚り状態に戻るためと考えられる。ただし、今回の実験においては撚り角度を変化させても強度の低下量がわずかであった。これは撚り角度の変化量が小さいためであると考えられる。今後、より大角度に変化させた場合においても確認を行って検証を行う予定である。

なお前節においても、図3に示したように引張負荷を受けた場合では撚り角度が減少するために、これらと同様の現象によって強度が低下したと推定できる。そして、この撚りの影響でロープの強度がポリアリレート繊維本来の強度と比較して低下しているように見えると考えられる。

#### 4. ロープ間角度による強度の変化

ネットは気球の膨張に応じて広がるため、気球の緯度によって網目のロープ間角度には違いが生じる。そこで網目部を含んだ2本のロープに対して引張試験を行った。初めに網目部を有するロープについて、3.1で行った単軸引張試験と同様に片方のロープのみに着目して試験を行った結果、引張強度は1340 MPaとなり、網目部無しのロープとほぼ同じ結果となった。また、破断時には網目部から破断せず、破断位置はロープの単軸引張試験と同様に分散していた。このことから、片方のロープに荷重が付加されていない状態であれば、網目部の影響はあまり生じないことがわかった。

次に、2本のロープを掴んで実験を行った。図9に実験装置図を示す。試験機のスパン間距離が $L_0$ の状態では2本の接合入りロープをチャックに取り付けて、角度 $\theta$ を測定した後に荷重を加えて、引張強度を測定した。試験速度はともに2 mm/minで、応力は前章にて算出した式を用いて補正を行い、見かけ応力を求めた。また、角度 $\theta$ を変化させることで角度と強度の関係を評価した。網目部角度と引張強度の関係を図10に示す。ただしゲージ長にはつかみ部間距離 $L_0$ を用い、ロープ径は図2の結果を用いて補正を行った。なお、試験は各角度で5回行い、つかみ部で破断したものを除外した結果を平均したものである。

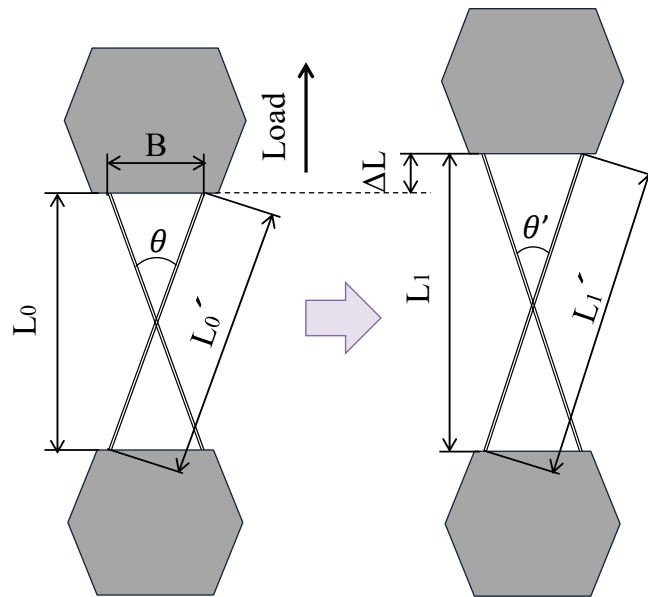


図 9 Experimental setup used for the measurement of the tensile strength of the net as a function of angle.

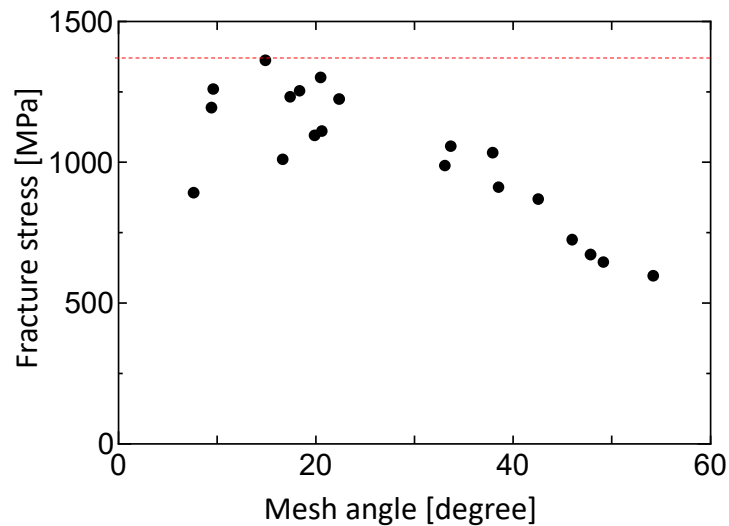


図 10 Relationship between the mesh angle and tensile strength.

図 10 より、メッシュ角度が小さい場合、図 5 におけるロープの破断強度（図中点線）よりわずかに低下する程度であるが、 $20^\circ$  を超えると強度は低下する傾向が見られた。次に破断時のひずみを比較した。破断時の実際のひずみ  $\varepsilon'$  は、網目の角度を  $\theta$ 、測定したひずみを  $\varepsilon$  とする式(2)で表せる。見かけ上のひずみおよび真ひずみと角度との関係を図 11 に示す。角度が大きくなるほど破断ひずみは大きくなる傾向であった。つまり、見た目よりも真ひずみが大きくなっている。

また、破断箇所は角度に関係なく全て網目部で破断した。図 12 にメッシュ部における代表的な破面を示す。破面はロープ単体の引張試験と比較して先端部の断面積が変化している部分が少ない傾向にあった。これはロープが網目部で接触による摩擦によって繊維が損傷して破断したことを示している。そして、その損傷によって強度が低下したと考えられる。角度が大きい場合では、小さい場合と比較して2本のロープの接触長さは小さいが、直交方向に近い角度で各ロープが変形するため、



網目部での単位面積当たりの摩擦が大きくなると考えられる。そのため、この抵抗によって摩擦が生じて多くの表層部の繊維を切断したため、メッシュ部の強度が低下したと考えられる。

$$\epsilon' = \frac{(1 + \epsilon) \cos \frac{\theta}{2}}{\cos \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{1}{1 + \epsilon} \tan \frac{\theta}{2} \right) \right\}} - 1 \quad (2)$$

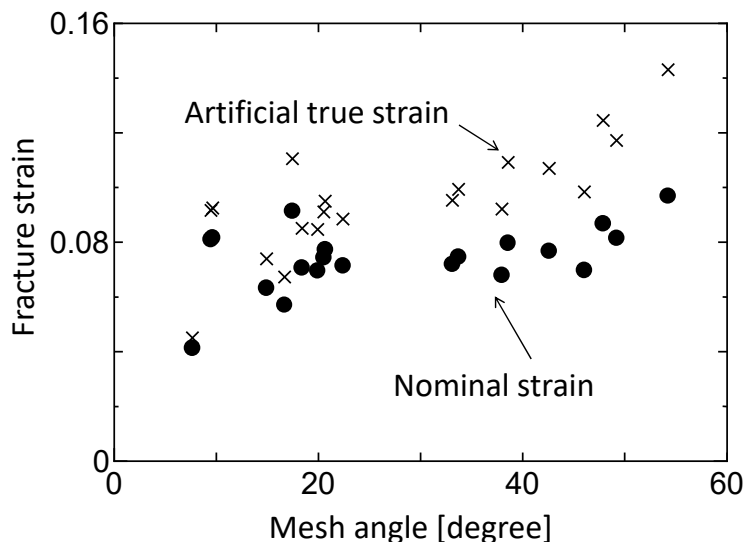


図 11 Relationship between fracture strain and the angle of the mesh.

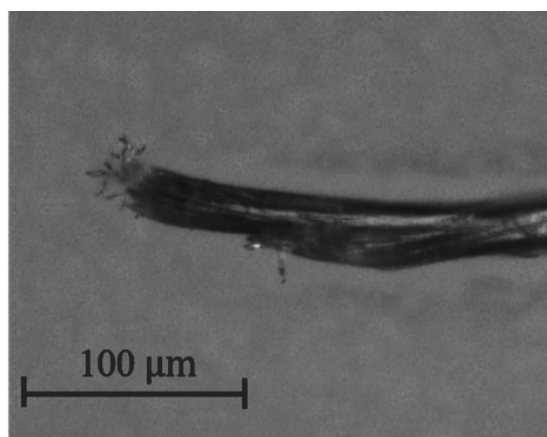


図 12 Fracture surface after the test with a mesh specimen.

実際の気球で使用する場合、気球の赤道部では角度が大きく、極部では角度が小さい。すなわち、緯度による影響を考慮して、ロープの強度を推定する必要がある。しかし、今回の実験における範囲の角度では、最も強度が低下したメッシュ角度 55 度の場合においても、ネットの強度はスーパープレッシャー気球で要求される強度の 3 倍程度であったことから、静的な荷重に対しては、ポリアリレート繊維の強度はスーパープレッシャー気球用網の材料として十分な強度であることが確認された。しかし、気球加圧時に不均一な展開が生じる場合などでは局所的にネットの網角度が増加する。その際に強度が低下する可能性があることから、気球全体の变形挙動には注意する必要があると考えられる。また、今回の結果は静的な荷重に対してのみであるため、今後、耐候試験やクリープ試験など時間依存性のある現象によってネットの強度がどのように低下するかを調査し、今回使用して

いるポリアリレート繊維がスーパープレッシャー気球用網の材料として十分な強度特性を有するかについて、安全率も含めて、さらに調査する予定である。

## 5. まとめ

スーパープレッシャー気球で使用が期待されているポリアリレート繊維ロープの強度特性を、引張試験によって調べた。結果は以下に要約された。

- (1) 引張試験中のロープを観察した結果、ロープは荷重増加とともに撚り角度が大きく変化して、実際のロープの変形以上に伸びが大きくなる傾向が見られた。
- (2) ロープの引張強度はバルク材の約 45 %、単繊維の結果と比較しても約 81 %とロープとして使用することで、強度が材料本来の値と比較して低下する傾向であった。しかし、スーパープレッシャー気球で要求される強度の約 7.9 倍の強度を有していた。
- (3) 撚り角度を変化させたロープの強度を調べた結果、撚り角度を変化させることでロープの力学的特性が変化することが確認された。ロープの撚り角を変化させると、撚り角が増加、減少どちらの方向に撚りを加えた場合においても引張強度は一度増加した後、低下する傾向が見られた。これは、撚り角が減少する場合においては撚り戻りによって、増加する場合においてはロープの内側の繊維に負荷が集中するためと考えられ、これが単繊維よりロープの引張応力が低下する原因の一つであると推定された。
- (4) 網目部を有するロープの強度を調べた結果、接合角度が大きい場合では強度が低下した。破面観察結果から、接触部の摩擦によってロープが損傷するためであると推定された。

## 謝辞

本研究は科研費 基盤研究 (A) 17H01352 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 矢島信之, 井筒直樹, 今村剛, 阿部豊雄, 気球工学(2004), コロナ社, p.12-13.
- [2] Vialettes, P., Siguier, J.M., Guigue, P., Karama, M., Mistou, S., Dalcerny, O., Granier, S. and Petitjean, F., Experimental and numerical simulation of super-pressure balloon apex section: Mechanical behavior in realistic flight conditions, *Advances in Space Research*, Vol.37 (2006), pp.2077-2081.
- [3] Cathey H.M. Jr., Development overview of the revised NASA Ultra Long Duration Balloon, *Advances in Space Research*, Vol.42 (2008), pp.1624-1632.
- [4] Welch, J.V., Wang, S., Blandino, J.R., and McEvoy, K., Super Pressure Balloon Non-linear Structural Analysis and Correlation Using Photogrammetric Measurements, *AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO 2005)* (2005), AIAA2005-7447.
- [5] Izutsu, N., Akita, D., Fuke, H., Iijima, I., Kato, Y., Kawada, J., Matsushima, K., Matsuzaka, Y., Mizuta, E., Nakada, T., Nonaka, N., Saito, Y., Takeda, A., Tamura, K., Yamada, K. and Yoshida, T., Development of a Super-Pressure Balloon with an Improved Design, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol.27 Issue ists27 (2010), pp. Pm\_7-Pm\_13.
- [6] Saito, Y., Iijima, I., Matsuzaka, Y., Matsushima, K., Tanaka, S., Kajiwaru and K. and Shimadu, S., Development of a super-pressure balloon with a diamond-shaped net, *Advances in Space Reserch*, Vol.54, No.8 (2014), pp.1525-1529.
- [7] 斎藤芳隆, 飯嶋一征, 松坂幸彦, 松嶋清穂, 田中茂樹, 梶原幸治, 島津繁之, スーパープレッシャー気球とゼロプレッシャー気球を組み合わせたタンデム気球の開発 II, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 大気球研究報告 JAXA RR-13-011 (2014), pp.1-34.
- [8] Akita, D., Saito, Y., Goto, K., Nakashino, K., Matsuo, T., Matsushima, K., Hashimoto, H. and Shimadu, S., Development of a super-pressure balloon with a diamond-shaped net for high-altitude long-duration flights, *Proceedings of IASS 2016 Tokyo Symposium (IASS 2016)* (2016), ID 1226.
- [9] Nakashino, K., Saito, Y., Goto, K., Akita, D., Matsuo, T., Matsushima, K., Hashimoto, H. and Shimadu, S., Super Pressure Balloon with Diamond-Shaped Net: A Numerical Study of its Structural Characteristics, *4th AIAA Spacecraft Structures Conference* (2017).
- [10] 岡本敏, 液晶ポリマー, 日本ゴム協会誌, Vol.81, No. 3 (2008), pp.86-92.
- [11] 中川潤洋, ポリアリレート繊維と熔融液晶紡糸, 繊維機械学会誌, Vol.56, No.5 (2003), pp.210-216.

- [12] 植田啓三, 全芳香族ポリエステル繊維ベクトラン, 繊維学会誌, Vol.43, No.4, (1987), pp.135-138.
- [13] 山本洋一, 高強力ポリアリレート繊維ベクトランの特性と用途, 繊維製品消費科学会誌, Vol.47, No.9 (2006), pp.520-523.
- [14] 吉田眞輝, 小林洋文, 荒川源臣, 奥村久雄, 繊維性ネットおよびロープを使用した落石防護柵の耐衝撃性試験, ジオシンセティックス論文集, Vol.23 (2008), pp.113-118.
- [15] 斎藤芳隆, 後藤健, 中篠恭一, 秋田大輔, 松尾卓摩, 河端昌也, 田村啓輔, 大谷章夫, 松嶋清穂, 橋本紘幸, 展開試験 一, 第16回宇宙科学シンポジウム 講演集 (2016), P-212.
- [16] 日本規格協会, 天然繊維の引張試験法, JIS L 1069 (2008).
- [17] ベクトラン製品情報, 株式会社クラレ Web サイト, <http://www.kuraray.co.jp/vectran/product/index.html>
- [18] 田中清人, 師橋勇二, ワイヤロープコンクリートの研究 その5 (ワイヤロープのより角度が付着強度に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系, 58 (1983), pp.153-154.