

B03 展開アンテナ構造用クォーツ繊維ケーブルの繰り返し引張特性

—撚りの有無による変形挙動の比較—

布川将成（日本大学），上田政人（日本大学），後藤健（JAXA）

Masanari Nunokawa (Nihon University), Masahito Ueda (Nihon University), Ken Goto (JAXA)

1. 緒言

電波天文衛星の観測精度向上のため，展開アンテナの大型化と高精度化が要求されている．一方で，ロケットの打ち上げ性能の制約から，軽量化も求められる．展開アンテナ構造には，アクチュエータ方式とケーブル/メッシュ方式とがある．アクチュエータ方式では，アンテナの展開後に鏡面形状の微調整を行えるため，高い鏡面精度を実現できるが，アクチュエータを搭載する必要があるために重量増となるデメリットがある．ケーブル/メッシュ方式⁽¹⁾は，アクチュエータを搭載しないために非常に軽量であるが，アクチュエータ方式に比べると鏡面精度が低いというデメリットを有する．しかしながら，展開時の鏡面精度はケーブルの力学特性に依存するから，ケーブルの力学特性を十分に把握して緻密な設計を行うことにより，高精度かつ軽量のケーブル/メッシュ方式のアンテナを実現することが可能になる．そこで本研究では，ケーブル/メッシュ方式の展開アンテナに使用されるクォーツケーブルアッセンブリ（以下，ケーブルアッセンブリ）の繰り返し引張試験を実施して，その変形挙動について調査した．

2. 実験方法

2.1 ケーブルアッセンブリ

ケーブル/メッシュ方式の展開アンテナには，クォーツ繊維を用いたケーブルアッセンブリが使用される⁽¹⁾．著者らは，これまでにこのケーブルアッセンブリの繰り返し引張特性を明らかにしてきた⁽²⁾．このケーブルアッセンブリの心材にはクォーツ繊維の撚糸が用いられていたが，本研究では撚りの無いクォーツ繊維を利用することによって，撚りの有無が繰り返し引張特性に与える影響について検討を実施した．

本研究で使用したクォーツケーブルを図1に示す．ケーブルは撚り無しのクォーツ繊維束を保護被覆材であるノームックス繊維で覆ったものである．ケーブルの両端部は折り返してチタン製の金具でかし

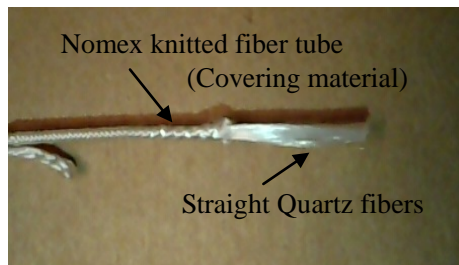


Fig. 1 Quartz fiber cable

めて、フープ状にしている（図 2）. このフープ部を展開アンテナのリブに接続してケーブルが張力を支持してアンテナの鏡面形状を保持する. ケーブルアッセンブリには全長が 100, 200, 300 mm の 3 種類を用意した. なお, ケーブルアッセンブリのフープ形状は, ケーブルの全長によらず同一である.

2.2 繰り返し引張試験

ケーブルアッセンブリの繰り返し引張試験は, 卓上型万能試験機 (STA-1150, オリエンテック) を用いて実施した. 図 2 のように, ケーブルアッセンブリのフープ部を専用治具に引っ掛けて引張負荷を与えた. 引張負荷に伴うケーブルアッセンブリの伸び量はレーザー変位計を用いて測定した. ケーブルアッセンブリを装着した際に生じるゆるみを取り除くため, 1 N の負荷を加えた後, その荷重を 0 N にリセットして, 繰り返し引張試験を開始した. 負荷速度は 0.5 mm/min であり, 最大 40 N までの引張負荷の後, 荷重が 0 N になるまで除荷するサイクルを合計 30 サイクル実施して, 荷重 - 変位線図を取得した.

3. 実験結果

3.1 ケーブルアッセンブリの変形挙動

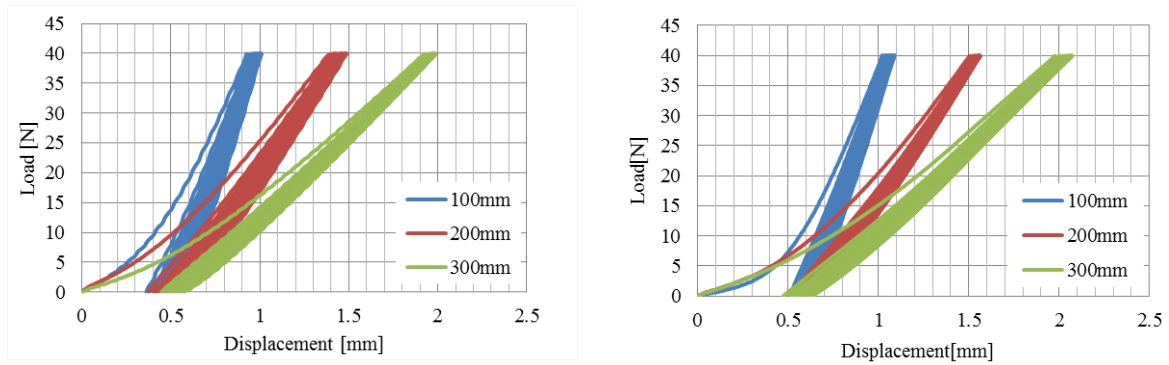
全長がそれぞれ 100, 200, 300 mm のケーブルアッセンブリについて, クォーツ繊維の撚りの有無による変形挙動の比較を行った. 撚り無し及び撚り有りのクォーツ繊維を用いたケーブルアッセンブリの荷重 - 変位線図をそれぞれ図 3(a), 3(b)に示す.

クォーツ繊維の撚りの有無に関わらず, 1 サイクル目の負荷の初期段階では大きな非線形挙動を示したが, 2 サイクル目以降では, ほぼ線形的な挙動となった. また, 繰り返し数の増大に伴って, 最大荷重時の伸び量 (以下, 累積変形) もクォーツ繊維の撚りの有無に関わらず増大している. 従って, クォーツ繊維の撚りの有無はケーブルアッセンブリの変形挙動にはほとんど影響を与えていない.

各サイクルにおける累積変形を求めたものを図 4 に示す. なお, 累積変形は, 1 サイクル目の最大負荷時 (40 N) の伸び量を基準にした, 各サイクルでの最大負荷時 (40 N) の伸び量とした. 繰り返し負荷によって, 累積変形が増大しているが, ケーブルアッセンブリの全長には依存せず同じ傾向を示している. 従って, 撚り無しのクォーツ繊維を用いた場合にも, 撚り有のクォーツ繊維を用いた場合と同様に⁽²⁾累積変形を生じ, また, 累積変形量はケーブルアッセンブリの長さには依存しないことが明らかになった.



Fig. 2 Test apparatus for cyclic tensile test of a cable assembly



(a) Straight quartz fiber cable

(b) Twisted quartz fiber cable⁽²⁾

Fig. 3 Cyclic load-displacement curves of cable assemblies

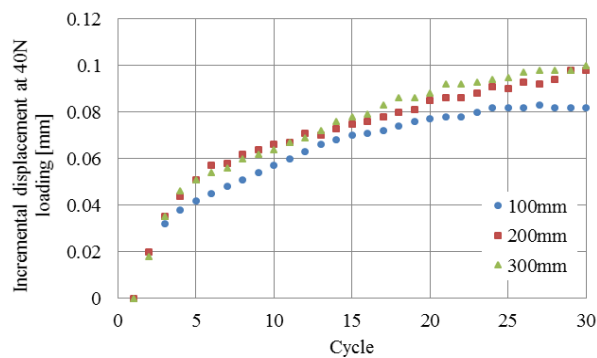


Fig. 4 Incremental displacement at 40N loading by cyclic tensile test (Straight quartz fiber cable)

3.2 セグメントごとの変形挙動

繰り返し引張負荷に伴って累積変形が生じる原因を究明するため、ケーブルアッセンブリを分割して各セグメント（ストレート部及びフープ部）の繰り返し引張試験を実施した。

3.2.1 ストレート部

ケーブルアッセンブリからフープ部を切断して取り除き、ストレート部のみを用いた繰り返し引張試験を実施した。ストレート部の両端を万能試験機の治具にエポキシ樹脂を用いて接着して、引張負荷を与えた。繰り返し引張試験より得られた累積変形を図 5 に示す。なお、ストレート部の全長は 100mm とした。

ケーブルアッセンブリの累積変形（図 4）と比較すると、ストレート部の累積変形は極めて小さい。なお、クォーツ繊維は脆性材料のために累積変形は生じないから、この累積変形はクォーツ繊維ではなく、固定端部におけるエポキシ樹脂の変形により生じたものであると考えられる。

3.2.2 フープ部

ケーブルアッセンブリからフープ部を切り出し、フープ部のみを用いた繰り返し引張試験を実施した。フープ部はエポキシ樹脂を用いて治具に装着した。その際、かしめ部を含めたフープ部（図 6a）と、か

しめ部を含めないフープ部 (図 6b) の 2 種類を用意し、かしめ部が累積変形に与える影響についても検討した。かしめ部を含めたフープ部と、かしめ部を含めないフープ部の繰り返し引張試験より得られた累積変形をそれぞれ図 7(a), 7(b)に示す。

かしめ部の有無に関わらず、フープ部の累積変形量はほぼ同じである。すなわち、かしめ部は累積変形に影響を与えていない。また、ケーブルアセンブリにおける累積変形 (図 4) とフープ部の累積変形量とがほぼ同じであるから、ケーブルアセンブリにおいて累積変形が生じている原因はフープ部に起因していると考えられる。

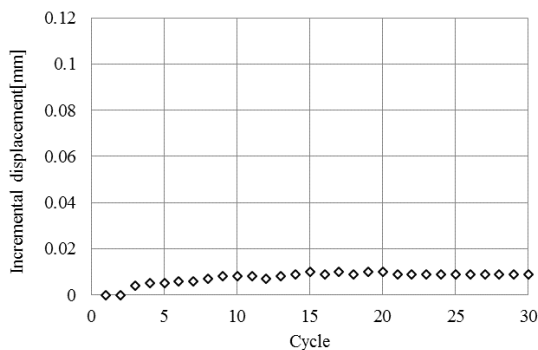
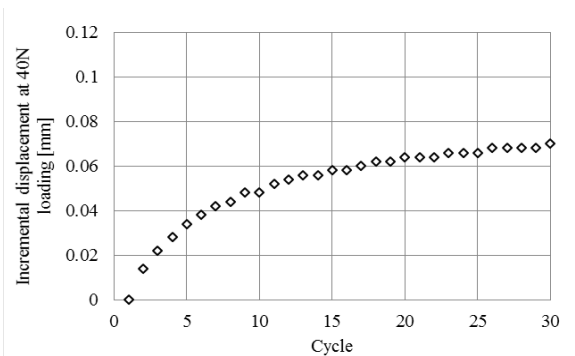
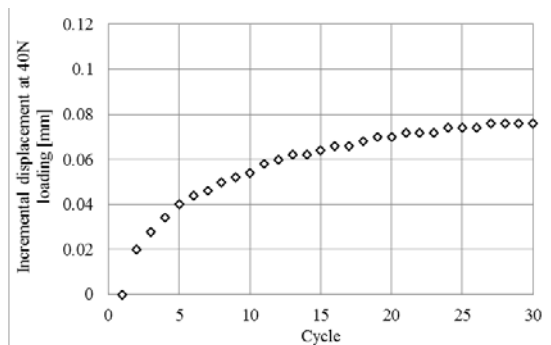


Fig. 5 Incremental displacement at 40N loading of a straight segment



(a) Hoop segment with clamp (b) Hoop segment without clamp

Fig. 6 Specimen configuration of a loop segment



(a) Hoop segment with clamp

(b) Hoop segment without clamp

Fig. 7 Incremental displacement at 40N loading of loop segments; Incremental displacement was doubled because a cable assembly has two loop segments at the ends.

3.3 セグメント試験の妥当性の評価

ストレート部とフープ部（かしめ部有）の繰り返し引張試験で得られた荷重－変位線図を足し合わせた結果を図 8 に示す。なお、全長が 100 mm のケーブルアセンブリの荷重－変位線図との比較のため、ストレート部の変形量は全長が 100 mm のケーブルアセンブリのストレート部長さに合わせている。

各セグメントの繰り返し引張試験による荷重－変位線図を足し合わせた荷重－変位線図は、ケーブルアセンブリの荷重－変位線図と（図 3a）とほぼ一致しており、このことからセグメント試験の妥当性が確認できる。

3.4 繰り返し引張荷重に伴う累積変形の発生メカニズム

3.2 章において、ケーブルアセンブリの累積変形はフープ部において生じていることが明らかとなった。そこで、フープ部において累積変形が生じるメカニズムについて検討を行った。フープ部に引張荷重が作用すると、図 9 のようにケーブルと治具との接触点においてケーブルの内外径差が小さくなるようにケーブルの扁平化が生じる。ケーブルの扁平化によって、カシメ部では内側のクォーツ繊維がフープ部側に引き抜かれる。繰り返し引張荷重によってこのようなケーブルの扁平化が進むことにより、

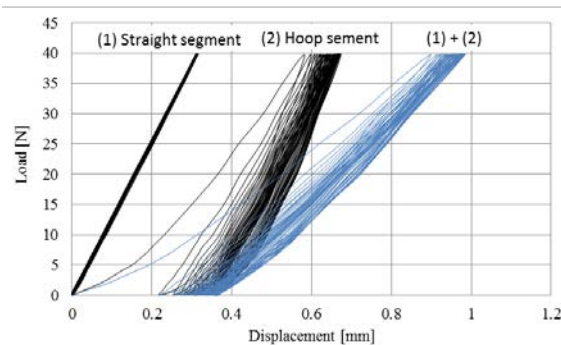
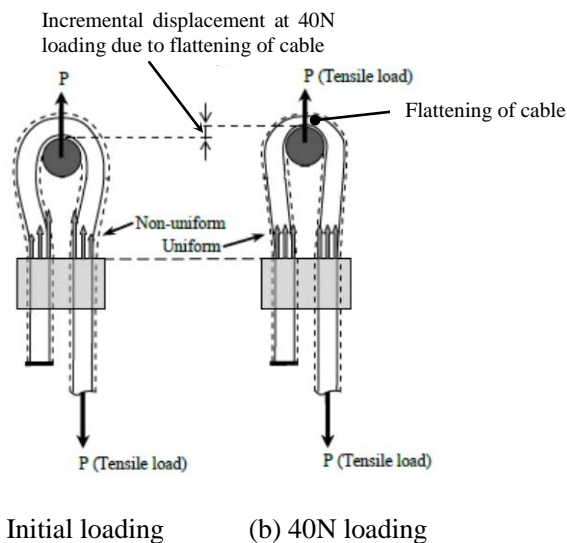


Fig. 8 Superposed load-displacement curves by a straight segment and a hoop segment with clamp



(a) Initial loading (b) 40N loading

Fig. 9 Flattening of a cable due to loading

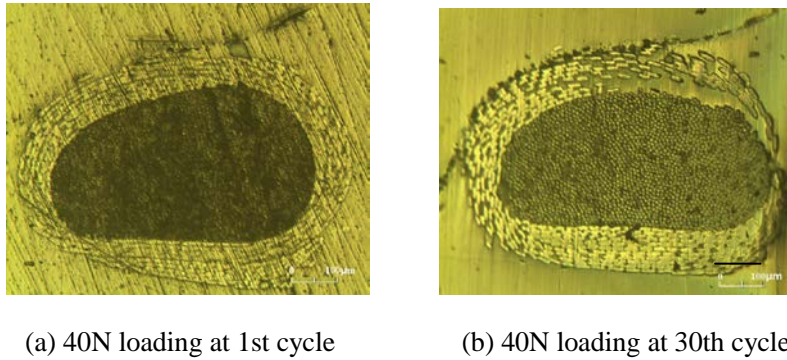


Fig. 10 Flattening of a quartz fiber cable

累積変形が増大していくと考えられる。そこで、ケーブルの扁平化が生じる個所（ケーブルと治具との接触点）において、ケーブルの断面観察を行い、扁平化に伴うケーブル断面の変形量を測定した。

1 サイクル目の最大負荷時のケーブルの断面観察写真を図 10(a)に、30 サイクル目の最大負荷時の断面観察写真を図 10(b)に示す。なお、これらの断面観察は、試験中に最大荷重を負荷した状態で樹脂埋めをして、樹脂が硬化した後に除荷し、断面研磨して観察した。

図 10(a)及び 10(b)を比較すると、繰返し引張負荷による扁平化によってケーブルの直径は 0.04mm 程度減少している。ケーブルアセンブリではこのフープ部が両端にあることを考慮すればケーブルの扁平化による累積変形量は 0.08mm 程度となり、フープ部の累積変形量（図 7）及びケーブルアセンブリの累積変形量（図 4）とほぼ一致する。

4. 結言

撚りの無いクオーツ繊維を用いたケーブルアセンブリの繰返し引張試験を実施して、累積変形の発生原因について調査した。得られた結果を以下に要約する。

1. クオーツ繊維の撚りの有無は、ケーブルアセンブリとしての繰返し引張挙動にほとんど影響を与えないことを明らかにした。
2. ケーブルアセンブリをセグメント（ストレート部及びフープ部）に分割したセグメント試験を実施した結果、累積変形はフープ部にて生じていることを明らかにした。
3. ケーブルの断面観察より、引張負荷に伴うフープ部でのケーブルの扁平化が累積変形を生じる原因であることを明らかにした。

参考文献

- (1) Goto, K., Kii, T., Yoshimura, K., Ishimura, K., Komatsu, K., Higuchi, K., Maruyama, T., Ikeda, Y., Matsumoto, K., Yoshihara, M. and Tsuchiya, M.: Long term durability of a rib and cable tensioned structure for high accuracy large deployable antenna reflector, Proceedings of 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011, c-12.
- (2) Ueda, M., Shiozaki, R., Goto, K., Koyanagi, J.: Tensile behavior of a quartz cable for deployable large precise space structure under cyclic load, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 12, No. ists29, (2014), p.Tc_7-Tc_12.