

コンベックステープを用いた自己伸展展開システムの研究

Study on self-deployment system with convex tape

宮崎研究室
井上 翔太, 鈴江 隼太

Abstract: In recent years, space utilization of a large expanded structure with excellent storage property and lightweight is expected. This research takes up the technique of using a convex tape as an expansion component at the time of deployment of a membrane or large space structure. And this paper describes the design and evaluation of the storage mechanism of convex tapes. This research has so far been studied only by trial and error in an experiment. Therefore, in this paper, the experimental results are compared with the theory which convex tapes expand or coiled on a circular spool.

1. 序論

1.1. 背景

近年, 宇宙用展開軽量構造物が注目されている. その中でもコンベックステープ(以下, UniCON テープ)を用いた展開手法は大型の機器を必要とせず, 剛性と自己伸展力を確保できる. よって UniCON テープは膜面構造物の伸展部材として用いられる. 実際に, NASA が開発した Nanosail-D2^[1]では膜の伸展部材としてコンベックステープが用いられた^[2](図 1).

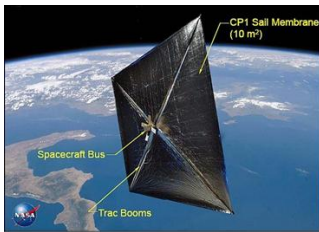


図 1 NanoSail-D2

また, より高い剛性を必要とする大型展開構造物に用いる部材として収納性に優れ, かつ比剛性の高い組紐被覆バイコンベックスブーム(BCON ブーム)が提案された^[3].

1.2. 本研究の目的

従来の UniCON テープを伸展部材とした膜面展開システムは, トライ&エラーにより機構を開発されている状況であり, 変形もしくは伸展する UniCON テープについて, 理論の構築が十分になされているとはいえない. また, BCON ブームを用いた大型展開構造物については研究が始まったばかりであり, BCON ブームの力学特性は明らかになっていない. このような状況をふまえ, 本研究は以下の 3 点を目的とする.

- UniCON テープ及び BCON ブームの変形理論を構築する.
- UniCON テープを用いた展開システムを試作し, その性能を定量的に評価する.
- BCON ブームの伸展機構(概念検討モデル)を試作し, その特性を実験により把握する.

1.3. UniCON テープを用いた膜面展開システム

UniCON テープとは, 市販のスチールメジャーに代表されるような一定の曲率を持った金属製のテープである (図 2).

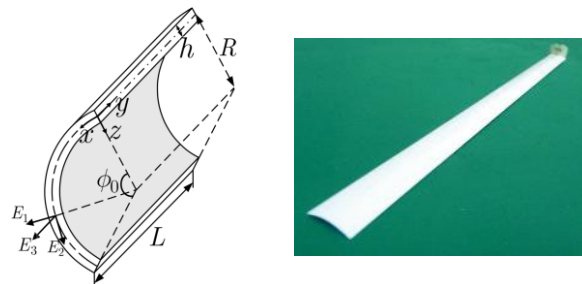


図 2 UniCON テープ(右:20cm スチールメジャー)

ハブに巻きつけられた UniCON テープは拘束がない場合, 自らの弾性力により元に戻ろうとし回転しながら解けていく. (図 3(左))そこで, 膜面展開システムではこの運動をローラーで摩擦を軽減しつつ一方方向に拘束することで, 伸展力を得る. (図 3(右))

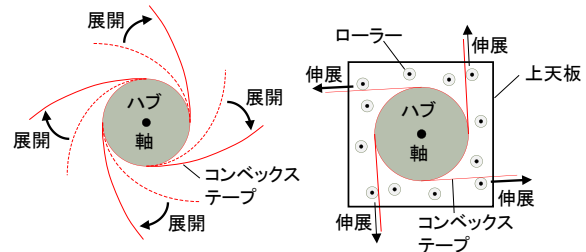


図 3 膜面展開システム拘束無し(左)と有り(右)

1.4. BCON ブームとは

BCON ブームは 2 枚の UniCON テープを組紐で合わせ閉断面状にしたブームである. 巻きつけ収納時, テープは平面上につぶれることができる. また組紐は軸方向への締めつけ力は強くないためにテープ同士はずれることができる. そのため巻き付け収納時の内外周差を吸収する. 図 4 右の黄色斜線部分が内側のテープがずれて周差を吸収した部分である. この構造により収納性に優れ 1 枚のテープより剛性が高いものとなる.

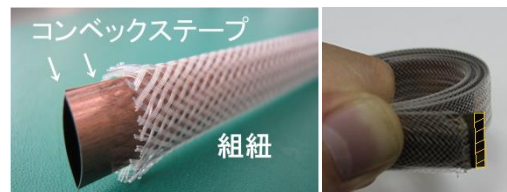


図 4 BCON ブーム(右図は収納時のブームの状態)

2. 変形理論^[4]

UniCON テープや BCON ブームを円筒状に収納する際の変形を解く．これにより，収納時に蓄えられる歪エネルギーや伸展力を理論的に評価できるようになる．ここでは特に，ハブに巻きつける曲率 κ を用いて，長手方向の単位長さ当たりの歪エネルギー及び曲げモーメントの解を導出する．

2.1. UniCON テープの変形理論^[5]

UniCON テープの座標系とモーメント，せん断，引張を図 2(変形前)，図 5(変形後)のように定義する．

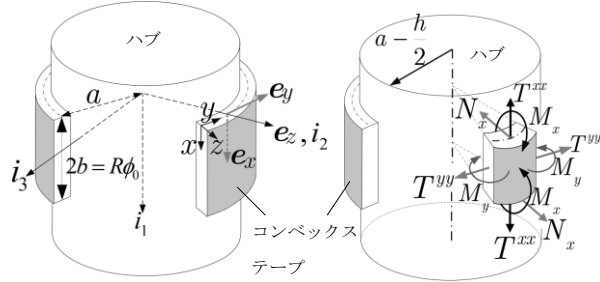


図 5 座標系，せん断，引張，モーメントの定義

x, y, z 方向のたわみを $u(x), v(y), w(x)$ とする．このとき，変形前，変形後の UniCON テープの位置はそれぞれ

$$\begin{cases} \mathbf{X} = (R - z)\mathbf{E}_1 - y\mathbf{i}_3 \\ \mathbf{x} = [x + u(x)]\mathbf{i}_1 + v(y)\mathbf{e}_2 + [a + w(x)]\mathbf{e}_3 \\ \quad + z\left[\mathbf{e}_3 + \frac{v(y)}{a}\mathbf{e}_2 - w'\mathbf{i}_1\right] \end{cases} \quad (1)$$

これより変形前，変形後の共変基底ベクトルは

$$\mathbf{G}_x = \frac{R - z}{R}\mathbf{E}_2, \quad \mathbf{G}_y = -\mathbf{i}_3, \quad \mathbf{G}_z = -\mathbf{E}_1 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{g}_x = (1 + u')\mathbf{i}_1 + w'\mathbf{e}_3 - zw''\mathbf{i}_1 \\ \mathbf{g}_y = \left(1 + \frac{w}{a} + v\right)\mathbf{e}_2 + \frac{z}{a}\mathbf{e}_2 - \frac{v}{a}\mathbf{e}_3 \\ \mathbf{g}_z = \mathbf{e}_3 + \frac{v}{a}\mathbf{e}_2 - w'\mathbf{i}_1 \end{cases} \quad (3)$$

正規直交座標系での Green-Lagrange 歪成分は，

$$\begin{cases} E_{xx} = \frac{1}{2}(\mathbf{g}_x \cdot \mathbf{g}_x - \mathbf{G}_x \cdot \mathbf{G}_x) \\ E_{yy} = \frac{1}{2}(\mathbf{g}_y \cdot \mathbf{g}_y - \mathbf{G}_y \cdot \mathbf{G}_y) \end{cases} \quad (4)$$

で定義されるため，埋め込み座標系では

$$\begin{cases} e_{xx} = \frac{1}{(1 - z/R)^2} E_{xx} \approx u' + z\left(\frac{1}{R} - w''\right) \\ E_{yy} = v + \frac{w}{a} + \frac{z}{a} \end{cases} \quad (5)$$

このとき，UniCON テープのポアソン比を ν ，ヤング率を E とすれば，第二 Piola-Kirchhoff 応力

$$\begin{cases} s^{xx} = S^{xx}(1 - z/R)^2 = \frac{E}{1 - \nu^2}[e_{xx} + \nu E_{yy}] \\ S^{yy} = \frac{E}{1 - \nu^2}[E_{yy} + \nu e_{xx}] \end{cases} \quad (6)$$

変形後の y 方向単位長さ当たりの歪エネルギー π_{umi} は

$$\begin{aligned} \pi_{umi} &= \int_{-b}^b dx \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1}{2} s^{xx} e_{xx} + S^{yy} E_{yy} \frac{R - z}{R} dz \\ &= \frac{1}{2R} \int_{-b}^b m_x dx + \frac{1}{2a} \int_{-b}^b m_y dx \\ &= \frac{A_0}{2} \left[(1 - \nu^2)\kappa^2 + \left(\frac{1}{R} + \nu\kappa\right)^2 (1 - A_1) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

ただし

$$\begin{cases} A_0 \equiv 2bD \left(1 - \frac{h^2}{12R^2}\right) = 2b \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \left(1 - \frac{h^2}{12R^2}\right) \\ A_1 = \frac{2(\cosh \eta - \cos \eta)}{\eta \sinh \eta + \sin \eta} \end{cases} \quad (8)$$

$$\kappa = \frac{1}{a}, p = \sqrt[4]{\frac{3(1 - \nu^2)}{1 - \frac{h^2}{12R^2}} \frac{\sqrt{2b}}{\sqrt{h}}}, \eta = \sqrt{2p}\sqrt{\kappa} \quad (9)$$

ここにおいて， π_{umi} はテープの伸展力に相当する．また，円筒の周に沿った曲げモーメントは

$$\begin{aligned} M_{umi} &= \frac{\partial \pi}{\partial \kappa} = A_0 \left[(1 - \nu^2)\kappa + \nu \left(\frac{1}{R} + \nu\kappa\right) (1 - A_1) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} + \nu\kappa\right)^2 \frac{\partial A_1}{\partial \kappa} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

2.2. BCON ブームの変形理論

UniCON テープの理論を利用した BCON ブームの理論を示す．組紐により 2 枚がエッジで接しているためテープは互いにせん断力を受ける．また，エッジにおいて，内側と外側の両者とも曲げモーメントが 0 で，かつ両者の変位が一致し，かつ，せん断力の和が 0 になるというのが境界条件となる．

エッジでせん断力を受ける 1 枚のテープの単位長さ当たりの歪エネルギーは

$$\pi = \pi_{umi} + N_x(b)[w(b) + av] \quad (11)$$

ただし

$$N_x \equiv \int_{-h/2}^{h/2} z \frac{\partial s^{xx}}{\partial x} \frac{R - z}{R} dz \quad (12)$$

境界条件を用いると，2 枚のテープを合わせたときの単位長さ当たりの歪エネルギーは

$$\begin{aligned} \pi^{total} &= \pi_{umi}(\kappa^{in}) + \pi_{umi}(\kappa^{out}) + \pi_c \\ &= \pi_{umi}(\kappa^{in}) + \pi_{umi}(\kappa^{out}) \\ &\quad + \frac{A_0}{2} \frac{\gamma^2}{b^2} \left[\frac{A_3^{in}}{4(p^{in})^4 (\kappa^{in})^2} + \frac{A_3^{out}}{4(p^{out})^4 (\kappa^{out})^2} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

ただし，添え字 in, out はそれぞれ内側，外側のテープに関する量であることを意味し，

$$\begin{cases} \kappa^{in} = \frac{1}{a - h/2} = \frac{\kappa}{1 - h\kappa/2} \\ \kappa^{out} = \frac{1}{a + h/2} = \frac{\kappa}{1 + h\kappa/2} \end{cases} \quad (14)$$

また，

$$A_3 \equiv \frac{\eta(\cosh \eta + \cos \eta)}{\sinh \eta + \sin \eta}, \gamma \equiv \frac{2b^2 N_x^{in}(b)}{D(1 - h^2/12R^2)} \quad (15)$$

曲げモーメントは

$$M^{total} = \frac{\partial \pi^{total}}{\partial \kappa} = \frac{1}{(1 - h\kappa/2)^2} M_{uni}(\kappa^{in}) + \frac{1}{(1 + h\kappa/2)^2} M(\kappa^{out}) + \frac{\partial \pi_c}{\partial \kappa} \quad (16)$$

3. 試作モデルによる実験

3.1. UniCON テープの展開実験

3.1.1. 展開機構

表 1, 図 6 に示すような UniCON テープを用いた展開機構を製作した。

表 1 膜面展開システムの諸元

ガイドローラー径	8[mm]	ハブ径	22[mm]
テープの曲率半径	13.5[mm]	ガイド径	32[mm]
テープの中心角	80.4[deg]	最外径	80[mm]

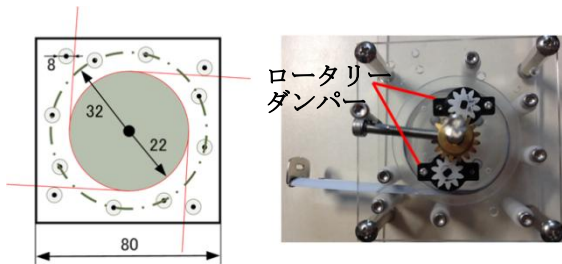


図 6 展開システムのご概念図(左)とモックアップ(右)

モックアップでは適宜ダンパーを取り付けることで、速度を管理できるようにしている(図 6). ダンパーとしては表 2 の 3 種類を用意した。

表 2 ダンパー仕様表

型式	定格トルク
FRT-G2-200	$(2 \pm 0.7) \times 10^{-3} [\text{N} \cdot \text{m}]$
FRT-G2-450	$(4.5 \pm 1) \times 10^{-3} [\text{N} \cdot \text{m}]$
FRT-G2-101	$(10 \pm 2) \times 10^{-3} [\text{N} \cdot \text{m}]$

実際にこの展開機構を用いて 4 本の UniCON テープをハブに巻きつけた場合の伸展実験は成功し、機構の妥当性は確認できた。

3.1.2. 最大伸展力の計測

今後の展開構造物の設計に必要な UniCON テープ 1 本の自己伸展力をフォースゲージで計測した。凸面を外側にしてハブに巻いた場合と内側にしてハブに巻いた場合(以下、純巻き、逆巻き)の伸展力の最大値を表 3 に示す。

表 3 純巻き、逆巻きの場合の伸展力比較

純巻き		逆巻き	
実験名	伸展力[N]	実験名	伸展力[N]
1 回目	0.393	1 回目	0.809
2 回目	0.411	2 回目	0.770
3 回目	0.494	3 回目	0.804
平均値	0.433	平均値	0.794

これより、逆巻きの方が伸展力は強く膜面展開システムの利用に、より適していることがわかる。また、逆巻きの伸展力の理論値は式(7)より導かれ、0.945[N]となる。これより約 0.15[N]の外乱が伸展を妨げているとわかる。よって、外乱の多くを占めていると思われる摩擦の軽減は今後の課題である。

3.1.3. 伸展力計測実験

この展開機構では、UniCON テープに伸展と逆方向に大きな荷重が加わると、ハブの回転速度が UniCON テープの伸展速度を上回り、テープがハブから剥離して伸展を妨げる(図 7(左))。その後、伸展が停止すると剥離したテープがガイドローラー内に溜まり、ハブの回転も停止する(図 7(右))。

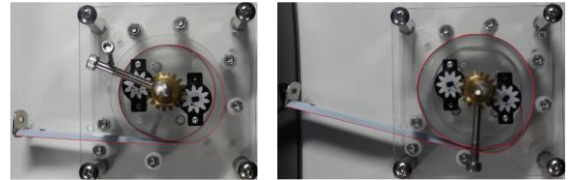


図 7 UniCON テープの剥離開始(右)と溜まり(左)

そこで、剥離が伸展力に与える影響を定量的に考慮するため以下のような実験装置を作成した。

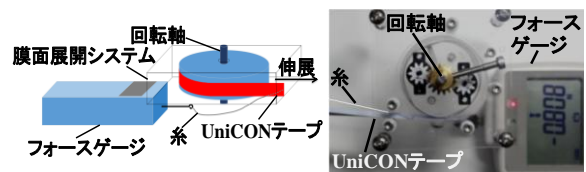


図 8 テープの剥離実験(概念図(左), 実験図(右))

固定された膜面展開システムの UniCON テープの先端に糸を結び、糸の他端を固定されたフォースゲージのフックに結んだ(図 8(左))。初め糸が弛んだ状態からテープを徐々に自己伸展させると、ある時点で糸がピンと張る(図 8(右))。この時点を実験原点として、それ以降のテープの自己伸展に伴う軸の回転角度を横軸に、フォースゲージの出力を縦軸にとったものが図 9 である。ハブは軸と一体であるため、テープが自己伸展しようとする時、糸があるためにテープはハブから剥離し、ハブと軸だけが空回りすることになる。これを純巻き、逆巻き 3 回ずつ行った。

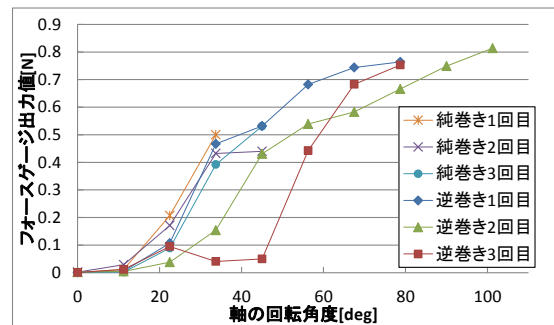


図 9 テープの剥離実験結果

図 9 を見ると純巻きに比べ逆巻きの方がハブの回転量が多く、最終的なフォースゲージの出力値が大きいことがわかる。UniCON テープを用いた膜面展開システムは、膜からの影響が伸展力の最大値を超えなければ、一度剥離し伸展速度が低下してもそこから伸展力が増加し剥離を解消することができる。また、図 9 からわかるようにハブが回転している間は伸展力が増加し続ける。これらのことを考慮すれば、剥離後の最終伸展力、軸の回転量に余裕がある逆巻きは純巻きに比べ、膜からのより大きな影響

にも耐え得ると考えられる。このことから、純巻きよりも逆巻きの方が膜面展開システムに適していると言える。

今後は、テープの剛性、曲率、厚さを変化させ、より大きな伸展力を得られるよう改良していく。

3.2. BCON ブームの伸展実験

3.2.1. 伸展システムの仕様

1本のBCONブームの両端に収納機構(以下、ノードと呼ぶ)を配したモデルを試作した。図10および表4にその外観や諸元を示す。

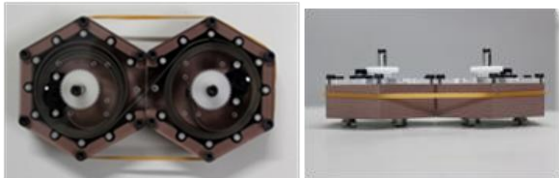


図10 概念検討モデル(左:上から撮影 右:横から撮影)

表4 概念検討モデル諸元

ノード間距離	1500mm	高さ	49.0mm
形状	六角形	サイズ	67.0mm 短辺
重量	197.80g		76.4mm 長辺

伸展速度の制御はダンパーを適宜取り付けで行う。ダンパーには表2と同じものを用いた。ブームがノードの内壁に触れるところにローラーがついており、摩擦を軽減している。また、伸展時に働く摩擦を軽減するために底面にボールローラーを取り付けている。

3.2.2. 伸展実験結果及びその考察

カメラを用いて機構全体と機構内部のブームの伸展挙動を撮影した。機構がブームの中心から互いに相対的に離れるようにして移動しブームは伸展する。伸展挙動を撮影したカメラ画像の一部を図11に示す。図11の緑線はノード内のブームの形状を表す。

また、ブームの自己伸展力の計測を行った。2つの片方のノードを固定し、他方のノードでブームが伸展する方向にフォースゲージを置く。巻かれたブームの長さ1周分を360degとして伸展するブームの伸展力を角度ごとに測る。図12に実験の様子、図13に実験結果を示す。

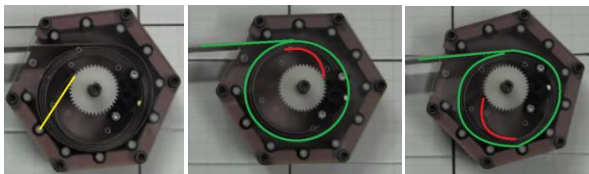


図11 内部のブーム挙動

(左:0deg (黄色:スタート位置) 中央:260deg 右:370deg)

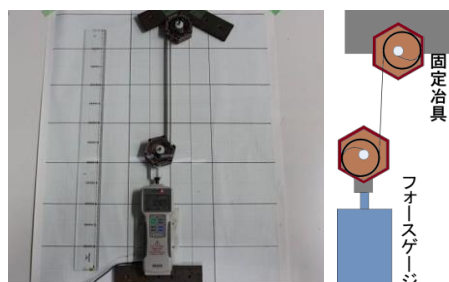


図12 伸展力計測(左:実験状態, 右:概念図)

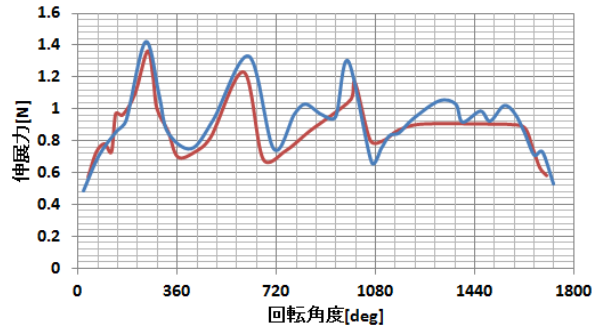


図13 伸展力推移(赤:FRT-G2-101 青:FR2-G2-200)

図13を見ると3周目まで(0deg~1080deg)伸展力が大きく変化している。図11の赤線はブームが軸に固定された部分である。この部分が内側から周りのブームを押し出すことで伸展力が変化していると考えられる。図11中央の状態が計測の結果伸展力最大である。このとき赤線がブーム全体を左側に押し、緑線が機構にぶつかっている。このとき働く力が伸展する方向だったため、伸展力は大きくなったと考えられる。このときに比べ図11右のときは伸展方向と逆に働くため、伸展力は小さくなっていると考えられる。このように、ノード内の状況によって伸展力が変化してしまい、安定しないという点は、展開信頼性という面で問題であり、ノード内のブームの収納方法、根元の固定方法などを工夫する必要がある。

今後は概念検討モデルの特性を踏まえて安定に伸展する新しい収納機構の開発を行う予定である。

4. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- UniCON テープ及び BCON ブームの変形理論を構築した。
- UniCON テープの展開システムを試作し、現状の性能を定量的に評価した。
- 1ブーム2ノードのBCONブーム伸展システムを試作し、その自己伸展力を明らかにした。それにより機構の特性を把握した。

謝辞

UniCON テープの展開システムの研究は総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。また、BCON ブームによる伸展システムの試作は、科研費の挑戦的萌芽研究(25630394)の助成の元、サカセ・アドテック(株)に協力いただいたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Grant.M.Thomas, Prototype Development And Dynamic Characterization Of Deployable Cubesat Booms ,March 2010
- [2] 相浦啓司: 膜面宇宙構造物の伸展部材用コンベックステープの展開挙動に関する研究, 2013
- [3] 渡邊秋人, 他, 「組紐を被覆した伸展構造物の検討」, 第56回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2012-4496, 2012
- [4] 小林繁夫, 近藤恭平: 弾性力学, 培風館, 1987
- [5] K.A. Seffen and S. Pellegrino, Deployment Dynamics of Tape Springs, Proc. R. Soc. Lond. A 1999 **455**, pp.1-47, March 1999.