

平織り複合材コンベックスブームの曲げ剛性

Flexural Rigidity of Plain Weave Composite Convex boom

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

内田希美

Nozomi Uchida

A winding storage type truss structure using self-extendible boom has high specific rigidity and storage ratio, and its deployment style is simple. Therefore, it can be expected to be applied to large-scale space structure in the future. Such a structure deploys by the self-extension force of the boom, but if the extension force is large, impact is applied to the member at the moment of deployment. If it is small, the structure will not overcome the frictional force and will not deploy and even if it deploys it does not have sufficient rigidity after deployment. Therefore, it is necessary to model the stiffness of the boom accurately in the design of the self-deployable truss and to analyze deployment of the whole structure. In this study, the behavior of a boom using a carbon fiber composite material (CFRP) is analyzed, which is lightweight and has high specific rigidity and has been increasingly used in the space industry in recent years. As a first step, the flexural rigidity of a CFRP convex boom is derived in this paper. Furthermore, a bending test was performed and the flexural rigidity was compared with the theoretical value.

1. 研究

1.1. 研究背景

近年、大型構造を用いた宇宙ミッションが提案・開発されている Starshade^[1] (Fig.1) や SSPS^[2] (Fig.2) 等は機能要求として、比剛性、収納率、形状精度、モジュール構造への適用性が考えられている。現時点では輸送の手段がロケットのみであり、宇宙空間へ輸送するためには構造物をフェアリング内部に収める必要がある。また、搭載可能な重量にも制限がある。そのため、既存の輸送システムを用いて軌道上に大型宇宙構造物を運ぶためには、展開構造を採用することが必須となっている。

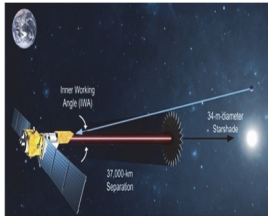


Fig.1 Starshade^[1]

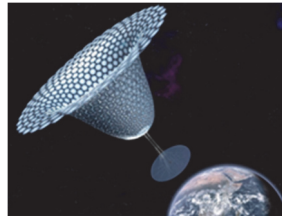
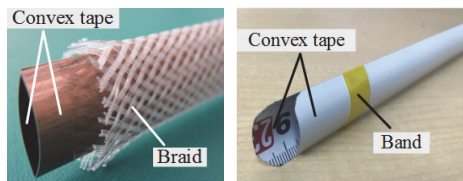


Fig.2 SSPS^[2]

自己展開構造に用いる部材として、これまで Fig.3 に示すようなバイコンベックスブームや、組紐被覆バイコンベックス (Braid Coated Bi-Convex:BCON) ブーム^[3] が主に挙げられている。これらの利点を以下に示す。

- ① テープの弾性による自己伸展力を有するため、展開動力を必要としない
- ② 薄肉部材を用いているため軽量である
- ③ 巻き取って収納できるため、収納効率が高い



(a)BCON boom

(b)bi-convex boom

Fig.3 Convex boom

本研究室では、自己伸展部材であるコンベックスブームを用いた自己展開トラスの概念を提案し、力学的特性を表す理論式の導出、試作モデルの作成、試作モデルを用いた展開実験、展開性評価から得られた設計上の注意点の整理点を行ってきた^[4-7]。ブームの課題として、中でもブームの伸展力については、以下のことが挙げられる。

- ① 伸展力が大きいと展開完了時に部材に強い衝撃がかかり破壊する恐れがある。
- ② また、伸展力が小さいと摩擦力に打ち勝てず伸展しなくなる。
- ③ 展開したとしても展開後の構造の剛性が不足する可能性がある。

これより、打ち上げ時の振動等の機械環境にも耐えうる設計にするために、ブーム・ダンパは適切なマージンをもった設計にする必要がある。

したがって、自己展開トラスの設計には、1本の部材の伸展挙動だけでなく、ノードやハブ、ならびに、膜も含めた全体構造の展開解析を行い、不具合モードとその発生条件を整理する必要がある。それには実際の現象を正確なモデル化が必須であり、具体的には以下の点を考慮しなければならない^[8]。

- 1) ブームの両端にノードが付いた構造のモデル化
 - 1-A) ブームの伸び、せん断、曲げ、ねじり変形
 - 1-B) ブームが繰り出る運動のハブに対する影響
 - 1-C) 巻き取り収納における、収納半径の変化
 - 1-D) ハブから離れるブームの剥離位置の変化
 - 1-E) ガイドとブームの間の接触力
 - 1-F) ダンパによる摩擦力
 - 1-G) 重力や空気抵抗力の考慮
- 2) 膜面を取り付けたトラス構造のモデル化
 - 2-A) 展開時の自己平衡形状
 - 2-B) 折り畳み形状
 - 2-C) 折り癖や折り目剛性等、膜面の折りの影響

このうち、1-A)について、CFRP 材でのコンベックステープ及びBCON ブーム (Fig.4) を用いたときの展開挙動を予測することで、ダンパやガイドへの影響を評価できる。また、展開部材に必要な曲げ特性が明らかになることで、Starshade や SSPS、スペースデブリ除去技術等、異なる条件の部材を検査が可能となる。

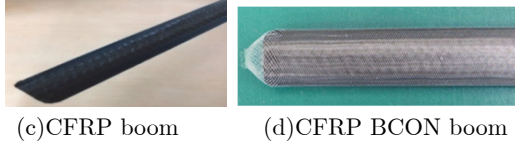


Fig.4 CFRP Convex boom

1.2. 研究の目的及び意義

前節までを踏まえ、本研究の目的を積層材コンベックステープの純曲げ理論の定式化とする。

この定式化で得られた構成則を展開挙動予測コードに組み込むことで、複合材ブームで構成された自己展開トラスの展開挙動や展開後の変形／振動特性を解析することができるようになる。この解析は、自己展開トラスの展開挙動のみでなく、宇宙用テザーの伸展挙動や、紡績技術などにも応用が可能であると考えられる^{[9]-[10]}。

2. 理論

本章では、積層コンベックステープの曲げ剛性の式を導出する。まず、Fig.5 に示すように座標軸及び形状を示す記号を定義する。

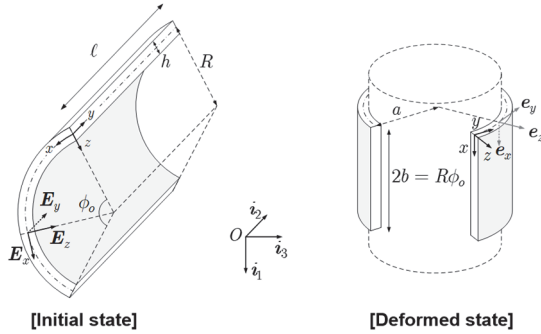


Fig.5 Definition of coordinate axis

2.1. 位置

まず、変形前のコンベックステープの形状を Fig.5 (Initial state)の通りとする。すなわち、テープの厚さを h 、凸形状を半径 R 、内角 ϕ_0 の円弧とする。また、図のように円弧に沿って x 軸、テープの長手方向に y 軸、円弧の半径方向で中心に向かう向きに z 軸を埋め込み、これらに沿った単位方向ベクトルをそれぞれ $\mathbf{E}_x = \mathbf{E}_x(x)$, $\mathbf{E}_y$, $\mathbf{E}_z = \mathbf{E}_z(x)$ とおくと、テープ内の任意の点の変形前の位置ベクトル $\mathbf{x}$ は次のように書ける。

$$\mathbf{X} = (z - R)\mathbf{E}_z(x) + y\mathbf{E}_y \quad (1)$$

次に、変形後の曲率半径を a とし、変形後の埋め込み座標の単位基底ベクトルを $\mathbf{e}_x$, $\mathbf{e}_y = \mathbf{e}_y(y)$, $\mathbf{e}_z = \mathbf{e}_z(y)$ 、中心軸 ($z = 0$) でのそれぞれの方向の変位を $u = u(x)$, $v = v(y)$, $w = w(y)$ とし、 u , v , w は微小であると仮

定すると、変形後の位置ベクトルは以下のよう書ける。

$$\mathbf{x} = u(x)\mathbf{e}_x + [y + v(y)]\mathbf{e}_y + [a + w(y)]\mathbf{e}_z + z[\mathbf{e}_z - w'(y)\mathbf{e}_y] \quad (2)$$

2.2. 変位-歪関係

埋め込み座標系における工学歪は次式で与えられる。

$$\begin{cases} e_{xx} = \varepsilon_{xx} + z\kappa_{xx} \\ e_{yy} = \varepsilon_{yy} + z\kappa_{yy} \end{cases} \quad (3)$$

ただし、変形前後の曲率を

$$\kappa_o \equiv 1/R, \quad \kappa \equiv 1/a \quad (4)$$

として、

$$\varepsilon_{xx} \equiv \dot{u} + \kappa w, \quad \varepsilon_{yy} \equiv v', \quad \kappa_{xx} \equiv \kappa, \quad \kappa_{yy} \equiv \kappa_o - w'' \quad (5)$$

2.3. 積層板の応力・歪関係

一般に、マトリックスの軸方向のヤング率を E_L 、それと直交方向を E_T 、ポアソン比を ν_{LT} 、せん断弾性係数を G_{LT} とし、繊維は等方性であるとして、ヤング率を E 、ポアソン比を ν とすれば、繊維の体積含有率を V_f とし、一方向繊維強化材料の等価剛性は、

$$\begin{cases} E_{11} = E_L V_f + E(1 - V_f) \\ E_{12} = -\frac{E_L V_f + E(1 - V_f)}{\nu_{LT} V_f + \nu(1 - V_f)} \\ E_{22} = E_T + E(1 - V_f) \\ G_{12} = G_{LT} V_f + G(1 - V_f) \end{cases} \quad (6)$$

そして、応力-歪関係は、

$$\begin{bmatrix} \sigma^{11} \\ \sigma^{22} \\ \tau^{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q_{11} = \frac{E_{11}}{W}, \quad Q_{22} = \frac{E_{22}}{W}, \quad Q_{12} = -\frac{E_{11}E_{22}/E_{12}}{W} \\ Q_{66} = G_{12}, \quad W \equiv 1 - \frac{E_{11}E_{22}}{E_{12}^2} \end{cases} \quad (8)$$

そして、積層板の i 層の繊維配向角を θ_i とし、 $c \equiv \cos \theta_i$, $s \equiv \sin \theta_i$ とすれば、 i 層の弾性マトリクスは

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \tilde{Q}_{11} & \tilde{Q}_{12} & \tilde{Q}_{16} \\ \tilde{Q}_{12} & \tilde{Q}_{22} & \tilde{Q}_{26} \\ \tilde{Q}_{16} & \tilde{Q}_{26} & \tilde{Q}_{66} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし、

$$\begin{cases} \tilde{Q}_{11} = c^4 Q_{11} + s^4 Q_{22} + 2s^2 c^2 Q_{12} + 4s^2 c^2 Q_{66} \\ \tilde{Q}_{12} = s^2 c^2 Q_{11} + s^2 c^2 Q_{22} + (c^4 + s^4) Q_{12} - 4s^2 c^2 Q_{66} \\ \tilde{Q}_{22} = s^4 Q_{11} + c^4 Q_{22} + 2s^2 c^2 Q_{12} + 4s^2 c^2 Q_{66} \\ \tilde{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{22} - 2Q_{66})c^3 s - (Q_{22} - Q_{11} - 2Q_{66})cs^3 \\ \tilde{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{22} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{11} - 2Q_{66})c^3 s \\ \tilde{Q}_{66} = s^2 c^2 Q_{11} + s^2 c^2 Q_{22} - 2s^2 c^2 Q_{12} + (c^2 - s^2)^2 Q_{66} \end{cases} \quad (10)$$

2.4. 複合材コンベックステープの構成則

埋め込み座標系での応力を (s^{xx}, s^{yy}, s^{xy}) とし、合応力を

$$\begin{cases} T_{xx} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} s^{xx} dz, T_{yy} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} s^{yy} dz, \\ S_{xy} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} s^{xy} dz, M_{xx} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} -zs^{yy} dz, \\ M_{yy} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} zs^{xx} dz, M_{xy} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} zs^{xy} dz, \\ N_{xx} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} z^2 s^{xx} dz, N_{yy} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} z^2 s^{yy} dz, \\ N_{xy} \equiv \int_{-h/2}^{h/2} z^2 s^{xy} dz \end{cases} \quad (11)$$

と定義し、合応力ベクトルおよび歪ベクトルを

$$\mathbf{T} \equiv \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ S_{xy} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} \equiv \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N} \equiv \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} \equiv \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\kappa} \equiv \begin{bmatrix} \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (13)$$

と定義すれば、構成則は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \\ \mathbf{D} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{\kappa} \end{bmatrix} \quad (14)$$

ただし、 $\mathbf{A} \sim \mathbf{E}$ は

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \tilde{\mathbf{Q}}_{\theta_i}(z_i - z_{i-1}) \\ \mathbf{B} = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{Q}}_{\theta_i}(z_i^2 - z_{i-1}^2) \\ \mathbf{D} = \frac{1}{3} \tilde{\mathbf{Q}}_{\theta_i}(z_i^3 - z_{i-1}^3) \\ \mathbf{E} = \frac{1}{4} \tilde{\mathbf{Q}}_{\theta_i}(z_i^4 - z_{i-1}^4) \end{cases} \quad (15)$$

2.5. エネルギーと曲げモーメント

まず、以下のように弾性係数 $a_{11} \sim d_{22}$ を定義する。

$$\begin{cases} a_{11} \equiv A_{11} - \kappa_o B_{11} - (A_{12} - \kappa_o B_{12}) \frac{A_{12} - \kappa_o B_{12}}{A_{22} - \kappa_o B_{22}} \\ b_{11} \equiv B_{11} - \kappa_o D_{11} - (B_{12} - \kappa_o D_{12}) \frac{A_{12} - \kappa_o B_{12}}{A_{22} - \kappa_o B_{22}} \\ b_{12} \equiv B_{12} - \kappa_o D_{12} - (B_{22} - \kappa_o D_{22}) \frac{A_{12} - \kappa_o B_{12}}{A_{22} - \kappa_o B_{22}} \\ d_{11} \equiv D_{11} - \kappa_o E_{11} - (B_{12} - \kappa_o D_{12}) \frac{B_{12} - \kappa_o D_{12}}{A_{22} - \kappa_o B_{22}} \\ d_{12} \equiv D_{12} - \kappa_o E_{12} - (B_{12} - \kappa_o D_{12}) \frac{B_{22} - \kappa_o D_{22}}{A_{22} - \kappa_o B_{22}} \\ d_{22} \equiv D_{22} - \kappa_o E_{22} - (B_{22} - \kappa_o D_{22}) \frac{B_{22} - \kappa_o D_{22}}{A_{22} - \kappa_o B_{22}} \end{cases} \quad (16)$$

これらを用いて、曲げ剛性等を次のように定義する。

$$\begin{cases} \tilde{D}_{xx} \equiv d_{11} - \frac{b_{11}^2}{a_{11}}, \quad \tilde{D}_{yy} \equiv d_{22} - \frac{b_{12}^2}{a_{11}}, \quad \tilde{\mu}_x \equiv \frac{b_{12}}{b_{11}}, \\ \tilde{D}_{xy} \equiv d_{12} - \frac{b_{11}b_{12}}{a_{11}}, \quad \tilde{\nu}_x \equiv \frac{\tilde{D}_{xy}}{\tilde{D}_{yy}}, \quad \tilde{\nu}_y \equiv \frac{d_{12}}{d_{22}}, \\ \mu_x \equiv \frac{d_{22}}{\tilde{D}_{xx} - \frac{\tilde{D}_{xy}^2}{\tilde{D}_{yy}}}, \quad \bar{\mu}_x \equiv \frac{b_{11}b_{12}}{\left(\tilde{D}_{xx} - \frac{\tilde{D}_{xy}^2}{\tilde{D}_{yy}}\right)a_{11}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \eta \equiv \left[\frac{b^2}{4} \frac{a_{11}}{d_{22}} \right]^{1/4} \sqrt{b|\kappa|}, \quad \zeta \equiv -\frac{b_{12}}{\sqrt{a_{11}d_{22}}} \text{sgn}(\kappa), \\ \tilde{A}_1 \equiv \sqrt{1 - \zeta^2} \times \\ \frac{\cosh(2\eta\sqrt{1 - \zeta}) - \cos(2\eta\sqrt{1 + \zeta})}{\eta \left[\sqrt{1 + \zeta} \sinh(2\eta\sqrt{1 - \zeta}) + \sqrt{1 - \zeta} \sin(2\eta\sqrt{1 + \zeta}) \right]} \end{cases} \quad (18)$$

単位長さあたりの歪エネルギー P は

$$P = \int_{-b}^b \left[\frac{1}{2} (\mathbf{T} - \kappa_o \mathbf{M}) \cdot \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{1}{2} (\mathbf{M} - \kappa_o \mathbf{N}) \cdot \boldsymbol{\kappa} \right] dy \quad (19)$$

でなるので、実際に計算すると、

$$\begin{aligned} & \frac{b}{\tilde{D}_{xx} - \frac{\tilde{D}_{xy}^2}{\tilde{D}_{yy}}} P = b^2 \kappa^2 \\ & + \left[\mu_x (b\kappa_o + \bar{\nu}_x b\kappa) (b\kappa_o + \tilde{\nu}_x b\kappa) \right] (1 - \tilde{A}_1) \\ & - \left[-\bar{\mu}_x b\kappa_o (b\kappa + \tilde{\mu}_x b\kappa_o) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

よって、曲げモーメント $M = \partial P / \partial \kappa$ は、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tilde{D}_{xx} - \frac{\tilde{D}_{xy}^2}{\tilde{D}_{yy}}} M = 2b\kappa \\ & + \left\{ \left[\mu_x (\tilde{\nu}_x + \bar{\nu}_x) - \bar{\mu}_x \right] b\kappa_o + 2\mu_x \tilde{\nu}_x \bar{\nu}_x b\kappa \right\} (1 - \tilde{A}_1) \\ & - \left[\mu_x (b\kappa_o + \bar{\nu}_x b\kappa) (b\kappa_o + \tilde{\nu}_x b\kappa) \right] \frac{\partial \tilde{A}_1}{\partial b\kappa} \\ & - \left[-\bar{\mu}_x b\kappa_o (b\kappa + \tilde{\mu}_x b\kappa_o) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

2.6. 曲げ剛性

(21)より、式接線曲げ剛性 $N \equiv \partial M / \partial \kappa$ は、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tilde{D}_{xx} - \frac{\tilde{D}_{xy}^2}{\tilde{D}_{yy}}} \frac{N}{b} \equiv \frac{1}{\tilde{D}_{xx} - \frac{\tilde{D}_{xy}^2}{\tilde{D}_{yy}}} \frac{\partial M}{\partial b\kappa} \\ & = 2 + 2\mu_x \tilde{\nu}_x \bar{\nu}_x (1 - \tilde{A}_1) \\ & - 2 \left\{ \left[\mu_x (\tilde{\nu}_x + \bar{\nu}_x) - \bar{\mu}_x \right] b\kappa_o + 2\mu_x \tilde{\nu}_x \bar{\nu}_x b\kappa \right\} \frac{\partial \tilde{A}_1}{\partial b\kappa} \\ & - \left[\mu_x (b\kappa_o + \bar{\nu}_x b\kappa) (b\kappa_o + \tilde{\nu}_x b\kappa) \right] \frac{\partial^2 \tilde{A}_1}{\partial (b\kappa)^2} \\ & - \left[-\bar{\mu}_x b\kappa_o (b\kappa + \tilde{\mu}_x b\kappa_o) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

したがって、ブームが真つすぐな状態 ($\kappa = 0$) での曲げ剛性を $N_o \equiv (\partial M / \partial \kappa)_{\kappa=0}$ とすれば、若干の計算により、以下になることがわかる。

$$N_o = 2b \left(\tilde{D}_{xx} - \frac{\tilde{D}_{xy}^2}{\tilde{D}_{yy}} \right) \quad (23)$$

3. 実験

3.1. 実験目的

実際の CFRP ブーム及び CFRP BCON ブームの曲げ剛性を計測し、2 節で示した結果の妥当性を検証する。

3.2. 実験装置および実験条件

キーエンス社のセンサヘッド IL300(レーザー変位計)及び IMADA 社のデジタルフォースゲージを用いて、Fig.6 のように曲げ試験機を製作し、実験を行った。また、試験片には「平織り」と呼ばれる Fig.7 のような形の複合材テープを用いた。

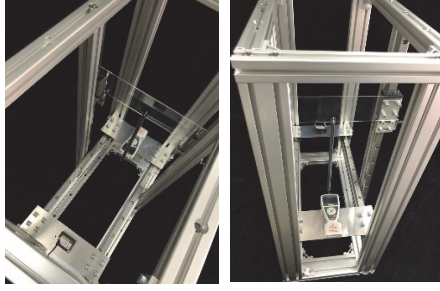


Fig.6 Bending tester

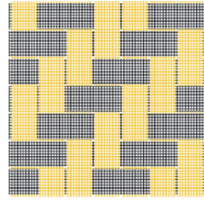


Fig.7 Plain weave composite boom

2節で示した式(23)を用いて、平織り CFRP ブーム、平織り CFRP バイコンベックスブーム、平織り CFRP BCON ブームの曲げ剛性を算出する。各値には、以下の Table 1 に示す値を用いる。これらの値は、現在本研究室で使用している平織り CFRP ブームの諸元値である。

また、本実験に用いたブームは 3 つあり、曲率が異なる。各値を Table 1 に値を示す。

Table 1 Material and geometric properties

b	23.3 mm	E_L	155 GPa
h	0.24 mm	E_T	8.75 GPa
$D = 2R$	16.0 mm	G_{LT}	3.88 GPa
	18.0 mm	ν_{LT}	0.25
	20.0 mm	E	3.50 GPa
		G	1.30 GPa
		ν	0.3

3.3. 実験結果

曲げ試験により得られた各ブームの曲げ剛性の値を Table 2 に示す。

Table 2 Experimental and theoretical bending stiffness

Φ○○、 順曲げor 引張	単一テープ スプリング 曲げ剛性 EI_{tape}^{Ex} (実験)	単一テープ スプリング 曲げ剛性 EI_{tape}^{th} (理論)	Bi-convex boom 曲げ剛性 EI_{Bi}^{Ex} (実験)	Bi-convex boom 曲げ剛性 EI_{Bi}^{th} (理論)	BCON boom 曲げ剛性 EI_{BCON}^{Ex} (実験)
Φ16,順曲げ	0.0765	0.0979	0.1823	0.1958	0.2452
Φ16,引張	0.0828		0.1890		0.2711
Φ18,順曲げ	0.0654	0.0774	0.1336	0.1548	0.1939
Φ18,引張	0.0701		0.1319		0.2000
Φ20,順曲げ	0.0599	0.0628	0.1004	0.1256	0.1786
Φ20,引張	0.0668		0.1102		0.1817
	$EI_{tape}^{Ex} < EI_{tape}^{th}$		$EI_{Bi}^{Ex} < EI_{Bi}^{th}$		

3.4. 考察

平織り CFRP ブームでは、初期歪が大きく、特に順曲げ試験においてがたつきがあった。引張試験では、試験中のねじりがほとんどみられず、理論値により近い結果となっている。同様に、平織り CFRP バイコンベックスブーム及び平織り CFRP BCON ブームも引張試験の方が、理論値に近い傾向になっている。また、平織り CFRP

バイコンベックスブームと平織り CFRP BCON ブームとの間において、実験値から曲げ剛性の差はかなり大きいことが確認できた。このことから、初期歪が少なかった平織り CFRP バイコンベックスブームと平織り CFRP BCON ブームは理論式で定義した初期歪がない場合と仮定することはできる。だが、実験値と理論値でわずかに誤差が発生していることから、実験の際の条件にもよるだろうが、それだけではなく繊維の編み方、いわゆるうねりの条件も考慮する必要がある。

理論から得られた曲率と曲げ剛性の関係から、曲率半径が大きくなるほど、曲げモーメントが低下している。

4. 結論

本小論では、まず、一枚の積層材コンベックステープを円弧状に曲げた際の円弧からの微小変形を定式化し、仮想仕事の原理から支配方程式を導出した。そして、それらを解くことで理論解を導き、曲率と歪エネルギー・曲げモーメント、曲げ剛性の理論式を示した。

今後は、積層材のうねり^{[11]-[12]}を考慮した展開挙動コードを作成し、1節にて述べた課題を解決していく。

参考文献

- [1] Tiffany Glassman, Amy Lo, Chuck Lillie, and Keith Kroening, New Worlds Observer Mission Design, AIAA Mission Design Paper, 2007.
- [2] John C. Mankins, SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array, NASA Innovative Advanced Concepts Program NIAC Phase 1 Final Report, 2012.
- [3] 渡邊秋人, 伊藤裕明, 堀利行, 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 年.
- [4] 田村明寛, バイコンベックスブームを用いた自己展開構造物の展開挙動, 平成 28 年度日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2017 年.
- [5] 井上翔太, BCON ブームを用いた自己展開トラスの構造の展開性評価, 平成 27 年度日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2016 年.
- [6] 福永桃子, 宮崎康行, 自己展開トラスの展開性向上, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2017-4701, 2017 年.
- [7] 山田晃一郎, BCON ブームの曲げ剛性, 平成 30 年度日本大学大学院理工学部航空宇宙工学科卒業論文, 2018 年.
- [8] 片岡星太, 円柱に巻き付けられたケーブルの繰り出し運動の ALE 法による定式化, 平成 31 年度日本大学大学院理工学部航空宇宙工学科卒業論文, 2019 年.
- [9] Michiel Kruijff, Erik J. van der Heide, Qualification and in-flight demonstration of a European tether deployment system on YES2, Acta Astronautica, 2008.
- [10] 竹内秀年, 井上剛志, 高木賢太郎, ねじりを考慮した柔軟な糸の解舒運動のマルチボディモデリングと数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.860, 17-00436, 2018 年.
- [11] 坂本陸, 青木隆平, 横関智弘, 渡邊秋人, CFRP を用いた宇宙用 bistable 開断面チューブにおける展開時の伸展力の定量的評価, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2015-4084, 2015 年.
- [12] D. Scida, a Z. Aboura, a M. L. Benzeggagha & E. Bocherensb, Prediction of the Elastic behavior of Hybrid and NON-HYBRID WOVEN Composites, Composites Science and Technology 57, 1727-1740, 1997.