

バイコンベックスプームを用いた自己展開構造物の展開挙動

Deployment Behavior of Self-Deployable Structure Consisting of Bi-Convex Booms

指導教授 宮崎康行

M5012 田村明寛

Akihiro Tamura

Self-deployable space structure which have convex tapes as extension booms has been actively studied and developed in recent years, because those tapes are lightweight, and have high efficiency for storage and self-extending force. Among those booms, a braid coated bi-convex (BCON) boom has been proposed. The BCON boom has higher specific rigidity than a single convex tape, so that it is expected to be applied for various large space structures. The author conducted microgravity experiments of self-deployable truss structure using BCON booms in order to perform the demonstration of deployment and to verify the validity of numerical analysis. In this paper, deployment behavior of the self-deployable truss structure in microgravity environment is investigated through the experimental and analytical result.

1. 序論

1.1 研究背景

近年、膜面展開型デオービット機構^[1]や、次世代の宇宙航行手段であるソーラーセイル^[2]など、膜面展開構造物の研究・開発が盛んに行われている。これらの展開構造物では、コンベックステープが膜面展開用の伸展部材として利用される場合が多い。コンベックステープによる展開機構は軽量であり収納性にも優れるため、宇宙機に搭載する上で非常に有利である。さらに、円筒状に収納されたコンベックステープはテープの弾性により自己伸展力を有するので、テープを伸展部材として用いた場合、展開動力を必ずしも必要としない点も大きな利点である。

また、剛性を強化するために2枚のコンベックステープを用いたバイコンベックスプームの提案がなされている。その中でも、組紐被覆バイコンベックスプーム^[3]（以下、BCONプーム）は、2枚のテープ同士が結合されておらず、互いにスライドできることが特徴である。なお、通常2枚のテープを重ねて同じ角度だけ巻き取ると、テープの厚みによって巻き取った長さに差が生じる。この巻き取り周差が多くなると収納性を損なうが、BCONプームがS字状になるように両端を巻き取ることで、巻き取り周差は打ち消され収納性を損なう事がない。

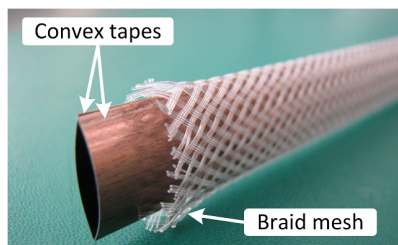


Figure 1 BCON boom

加えて、BCONプームによる自己展開構造物では、各プームの伸展時において、高い展開同期性を確保しなくとも展開可能であることが実験的に検証されており^[4]、BCONプームは自己展開構造物への適用性が高いと考えられる。以上のように、自己展開構造物への適用メリットが多く、収納性を維持しながらも剛性と自己伸展力に優れるBCONプームは、デオービット機構としての実用化や大型構造物への応用が期待されている。このことから、予め地上で宇宙空間での展開挙動を検証し、実現可能性を評価することが求められており、自己展開挙動を定量的に把握することが重要となる。

1.2 本研究の目的

前節を踏まえ、BCON プームを部材とする自己展開構造物について、展開実験と数値解析により、自己展開挙動を明らかにすることを本研究の目的とする。具体的な研究内容は以下の3つである。

- 宇宙環境を模擬した微小重力環境における展開実験を行い、実際の展開挙動を把握する。
- 自己展開時の運動方程式を導出し、その数値解析結果を示す。また、解析結果を実験結果と比較することで、解析の妥当性を示すこと。
- 実験および解析の結果から、展開特性を明らかにする。

2. BCONプームを用いた自己展開構造物

BCON プームを用いた自己展開構造物は、主としてプームとその収納機構であるノードから構成されている。収納時はプームをノード中央のハブに巻き取っておき、展開時には収納時にプームに蓄えられる歪エネルギーを自己伸展力として利用することで、無動力による展開を実現している。また、プームの伸展方向は、ガイドローラの位置によって任意に決定することができ、プームとノードを組み合わせることで、多様な形や大きさの構造物を構築することが可能である。

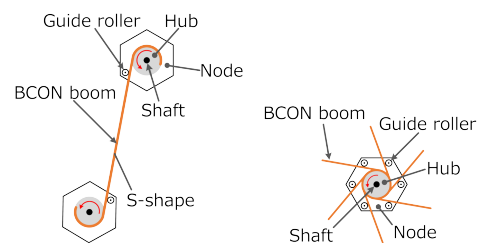


Figure 2 Concept of self-deployable structure using BCON booms

なお、展開過程においてハブの角速度が過剰に速くなると、プームがハブから剥がれ、ノード内部で不規則な挙動を示すことが経験的に知られている^[5]。この剥離現象は、展開の信頼性を損なうため、ノードにロータリーダンパを取り付け、ハブの角速度を抑制している。

3. 展開挙動解析

本章では、Figure 3に示す3N3B(3 Nodes and 3 Booms)トラス構造を対象として、自己展開時の運動方程式を導出する。なお、ここでは4章で述べる実験条件に合わせ、ノード3つの内1つは固定されているものとし、その固定点を原点として、Figure 4に示す通り座標系を定義する。

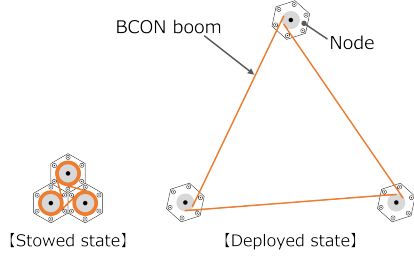


Figure 3 3N3B truss structure image

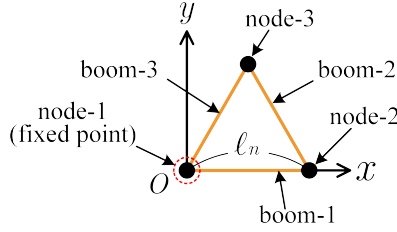


Figure 4 Analysis model of 3N3B truss structure

運動方程式は、ハブの回転角 α を一般化座標とし、式(1)のラグランジュ方程式に従って導出する。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = Q \quad (1)$$

L はラグランジアン、 Q は一般化外力である。また、収納状態におけるブームの形状は螺旋状であると考え、ブームの収納半径 r は、

$$r = a(\phi_o - \alpha) + r_h, \quad a \equiv \frac{nt_b}{2\pi} \quad (2)$$

で表されるものとする。ここで、 n は1つのハブに対して取り付けるブームの本数、 t_b は収納状態におけるブームの厚み、 ϕ_o は初期（収納）状態におけるブームの巻取り角、 r_h はハブの半径である。

3.1 運動エネルギー

自己展開構造物の構成品を「ブーム」、「ハブ（ノードの一部）」、「ケース（ノードの一部）」の3つに大別して、各構成品について並進運動と回転運動に関するエネルギーを考える。すなわち、

$$T = T_c^t + T_h^t + T_b^t + T_h^r + T_b^r \quad (3)$$

である。ここで、上付き添え字 t と r は、それぞれ並進運動と回転運動に関するエネルギーであることを意味する。また、下付き添え字 c と h 及び b は、それぞれケースとハブ及びブームに関するエネルギーであることを意味する。なお、ノードのケース部分と伸展したブームに関しては、ほとんど回転運動をしないため、その影響は微小であると考え考慮しない。

まず始めに、ケース及びハブの並進運動エネルギー T_c^t 、 T_h^t について考える。ノード2の位置ベクトル $\mathbf{x}_{n2}$ は、

$$\mathbf{x}_{n2} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{4r^2 + \ell_e^2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

である。ここで、 ℓ_n は各ノード間の距離、 ℓ_e はブーム伸展部分の長さである。このとき運動エネルギーは、

$$T_{n2}^t = \frac{1}{2} m_n \dot{\mathbf{x}}_{n2} \cdot \dot{\mathbf{x}}_{n2} = \frac{m_n}{2} \frac{(4r\dot{r} + \ell_e \dot{\ell}_e)^2}{4r^2 + \ell_e^2} \quad (5)$$

となる。ただし、 m_n はノードの質量である。対称性により、ノード2とノード3の運動エネルギーは等しいので、

$$T_n^t = T_c^t + T_h^t = 2T_{n2}^t = m_n \frac{(4r\dot{r} + \ell_e \dot{\ell}_e)^2}{4r^2 + \ell_e^2} \quad (6)$$

次に、ブーム1とブーム2の位置ベクトル $\mathbf{x}_{b1}$ 、 $\mathbf{x}_{b2}$ は、

$$\mathbf{x}_{b1} = \frac{\ell_n}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_{b2} = \frac{\sqrt{3}\ell_n}{2} \begin{bmatrix} \cos(\pi/6) \\ \sin(\pi/6) \end{bmatrix} \quad (7)$$

であるから、ブーム質量を m_b とすれば、並進運動エネルギーは、

$$T_{b1}^t = \frac{1}{8} m_b \frac{(4r\dot{r} + \ell_e \dot{\ell}_e)^2}{4r^2 + \ell_e^2}, \quad T_{b2}^t = \frac{3}{8} m_b \frac{(4r\dot{r} + \ell_e \dot{\ell}_e)^2}{4r^2 + \ell_e^2} \quad (8)$$

となる。よって、ブーム3本分の運動エネルギーは、

$$T_b^t = 2T_{b1}^t + T_{b2}^t = \frac{5}{8} m_b \frac{(4r\dot{r} + \ell_e \dot{\ell}_e)^2}{4r^2 + \ell_e^2} \quad (9)$$

一方、回転運動エネルギーについては、ハブ及び収納状態のブームの慣性モーメントを I_h 、 I_{bs} とおけば、全体で、

$$T_h^r = \frac{3}{2} I_h \dot{\alpha}^2, \quad T_b^r = \frac{3}{2} I_{bs} \dot{\alpha}^2 \quad (10)$$

である。ここで、ブームの慣性モーメント I_{bs} は、

$$I_{bs} = \int_S r^2 \rho ds = 2\rho \int_0^{\phi_o - \alpha} (a\theta + r_h)^2 \sqrt{(a\theta + r_h)^2 + a^2} d\theta \quad (11)$$

である。ただし、 ρ はブームの線密度である。

3.2 ポテンシャルエネルギー

ポテンシャルエネルギーは、コンベックステープを巻き取って収納したときに生じる歪エネルギーに相当する。テープに蓄えられる単位長さ当たりの歪エネルギーを π とすると、ブーム3本分では、

$$\begin{aligned} V &= 3 \int_S (\pi_{in} + \pi_{out}) ds \\ &= 6 \int_0^{\phi_o - \alpha} \pi_{in} \sqrt{(a\theta + r_h - h/2)^2 + a^2} d\theta \\ &\quad + 6 \int_0^{\phi_o - \alpha} \pi_{out} \sqrt{(a\theta + r_h + h/2)^2 + a^2} d\theta \end{aligned} \quad (12)$$

となる。なお、 π の下付き添え字 in と out は、コンベックステープが巻取り時において、内側あるいは外側であるかを意味する。このコンベックステープの歪エネルギー π については、式(13)に示す解析解が提案されている^[6]。

$$\pi = b\tilde{D} \left\{ (1 - \nu^2) \kappa^2 + (\kappa_o + \nu\kappa)^2 (1 - A_1) \right\} \quad (13)$$

$$\tilde{D} = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \left(1 - \frac{h^2 \kappa_o^2}{12} \right) \quad (14)$$

$$A_1 = \frac{\cosh 2\eta - \cos 2\eta}{\eta(\sinh 2\eta + \sin 2\eta)}, \quad \eta = \sqrt[4]{\frac{Eb^4 h \kappa^2}{4\tilde{D}}}$$

ただし、 b はテープ断面の円弧長さの半値、 h はテープの厚み、 κ_o は伸展状態におけるテープ断面の曲率、 κ は収納状態におけるテープの曲率、 E はテープ材料のヤング率、 ν はテ

ープ材料のポアソン比である．ここで， π_{in} ， π_{out} を計算する際の曲率 κ であるが，ブームの巻取り角 θ に対して，内側と外側のテープ収納半径 r_{in} ， r_{out} は式(15)で表されるので，曲率 κ_{in} ， κ_{out} は式(16)で表される．

$$r_{in} = a\theta + r_h - h/2, \quad r_{out} = a\theta + r_h + h/2 \quad (15)$$

$$\kappa_{in} = \frac{r_{in}^2 + 2a^2}{(r_{in}^2 + a^2)^{3/2}}, \quad \kappa_{out} = \frac{r_{out}^2 + 2a^2}{(r_{out}^2 + a^2)^{3/2}} \quad (16)$$

3.3 一般化外力

一般化外力として，ブームとガイドローラ間の摩擦 F とダンパによる反トルク T_d を考える．両者による仮想仕事 δW は，

$$\delta W = -3T_d\delta\alpha - 6F\sqrt{\{a(\phi_o - \alpha) + r_h\}^2 + a^2}\delta\alpha \quad (17)$$

となるので，一般化外力 Q は，次式で表される．

$$Q = -3T_d - 6F\sqrt{\{a(\phi_o - \alpha) + r_h\}^2 + a^2} \quad (18)$$

3.4 運動方程式

ラグランジアンは，3.1節および3.2節より，

$$\begin{aligned} L = T - V \\ = \left(m_n + \frac{5}{8}m_b \right) \frac{(4r\dot{r} + \ell_e\dot{\ell}_e)^2}{4r^2 + \ell_e^2} + \frac{3}{2}(I_h + I_{bs})\dot{\alpha}^2 \\ - 6 \int_0^{\phi_o - \alpha} \pi_{in} \sqrt{(a\theta + r_h - h/2)^2 + a^2} d\theta \\ - 6 \int_0^{\phi_o - \alpha} \pi_{out} \sqrt{(a\theta + r_h + h/2)^2 + a^2} d\theta \end{aligned} \quad (19)$$

であるから，式(1)に従って計算すると次の運動方程式を得る．

$$\begin{aligned} p_1\ddot{\alpha} = p_2\dot{\alpha}^2 + 6 \left(\pi_{in}\sqrt{r_{in}^2 + a^2} + \pi_{out}\sqrt{r_{out}^2 + a^2} \right) \\ - (3T_d + 6F\sqrt{r^2 + a^2}) \end{aligned} \quad (20)$$

ただし，

$$\begin{aligned} p_1 &\equiv 8a^2M \frac{(-2r + \ell_e \cosh x_{\phi_o - \alpha})^2}{4r^2 + \ell_e^2} + 3I_h \\ &\quad + \frac{3}{16}a^3\rho \left\{ \sinh 4x_{\phi_o - \alpha} - \sinh 4x_0 - 4(x_{\phi_o - \alpha} - x_0) \right\} \\ p_2 &\equiv -8a^2M \frac{-2r + \ell_e \cosh x_{\phi_o - \alpha}}{4r^2 + \ell_e^2} \left\{ 2a(1 + \cosh^2 x_{\phi_o - \alpha}) \right. \\ &\quad \left. - \ell_e \tanh x_{\phi_o - \alpha} \right\} \\ &\quad + 16a^3M \frac{(-2r + \ell_e \cosh x_{\phi_o - \alpha})^3}{(4r^2 + \ell_e^2)^2} \\ &\quad - \frac{3}{8}a^3\rho \frac{1 - \cosh 4x_{\phi_o - \alpha}}{\cosh x_{\phi_o - \alpha}} \\ M &= m_n + \frac{5}{8}m_b \\ x_{\phi_o - \alpha} &= \sinh^{-1}(\phi_o - \alpha + r_h/a), \quad x_0 = \sinh^{-1}(r_h/a) \end{aligned} \quad (21)$$

である．

4. 微小重力環境における展開実験

4.1 実験目的と概要

本実験の目的は，微小重力環境における展開挙動を計測することである．このため，2台のビデオカメラを用いたステレオ画像法を利用し，供試体の展開過程における3次元的な位置を計測した．

4.2 実験供試体と実験条件

実験に用いた供試体は Figure 5 に示す 3N3B トラス構造である．採用した BCON ブームの仕様は，Table 1, Table 2 および Figure 6 に示した．また，実験条件は Table 3 の通りである．

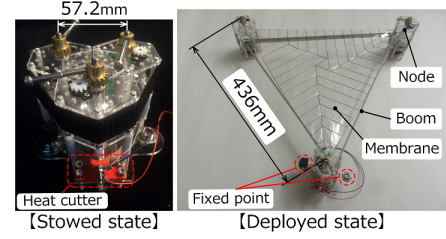


Figure 5 3N3B truss structure

Table 1 Material properties of BCON boom

Length : L_b [mm]	440.0
Line density : ρ [g/mm]	27.91×10^{-3}
Poisson's ratio : ν [-]	0.30
Young's modulus : E [GPa]	206

Table 2 Shape parameters of convex tape

V [mm]	14.48	ϕ [rad]	0.8966
t [mm]	1.66	b [mm]	7.50
R [mm]	16.6	h [mm]	0.1

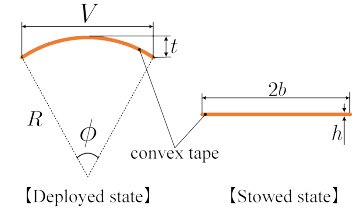


Figure 6 Cross-sectional shape of convex tape

Table 3 Experimental condition

No.	Torque of dampers T_d [Nm]	Membrane
1,2	16×10^{-3}	without
3	16×10^{-3}	with
4,5	20×10^{-3}	without

4.3 実験系

実験に用いたラック外観を Figure 7 に示す．供試体の展開は，微小重力検知信号を自動解放制御基板が取得すると，供試体の展開を保持しているテグスがニクロム線式のヒートカッターで切断され，自己展開が始まる仕組みになっている．

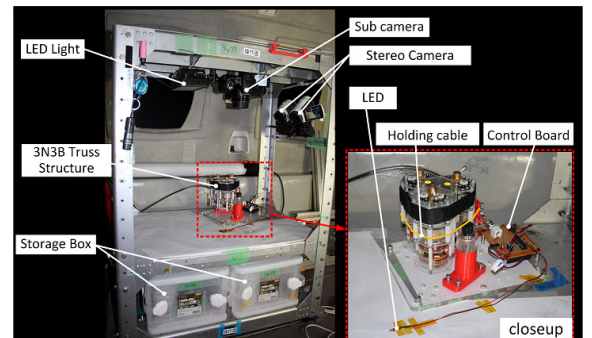


Figure 7 Overview of experimental rack

4.4 実験結果

実験結果として、微小重力環境における展開挙動を Figure 8 に示す。また、展開過程におけるノード間距離の時間履歴を Figure 9 に示す。なお、Figure 9 において、凡例の No. は Table 3 中の実験番号を表しており、黒い実線と破線は式(20)を用いた数値解析結果である。また、Figure 10 には、数値解析結果に対する実験結果の誤差を示した。

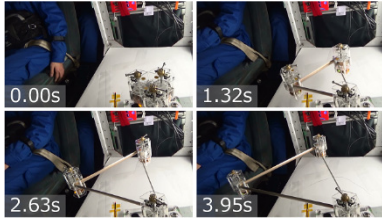


Figure 8 Deployment behavior under microgravity environment

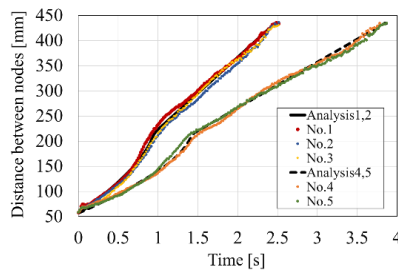


Figure 9 Distance between nodes during self-deployment

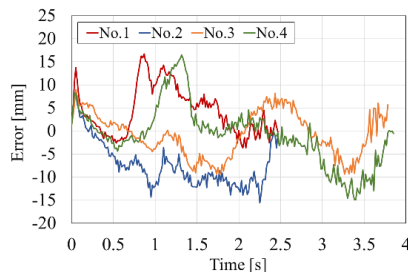


Figure 10 Error between experiment and analysis result

4.5 考察

Figure 9 から、自己展開過程において、ブームの伸展速度が概ね一定で推移している領域と、加速的に進んでいる領域（展開過程の中盤）があることが分かる。ブーム伸展が不連続的に加速する要因として、ブームがハブから剥離する際に、自己伸展力に加えて、ブームが外側に広がろうとする力が生じていることが挙げられる。なお、剥離現象については、3 章に示した展開挙動解析モデルには反映できていない。つまり、式(20)に示した運動方程式の右辺第 2 項（ブームの自己伸展力）が、展開過程において一時的に、理論からずれているということである。この点については、フォースゲージを用いて実験的に求めたブームの自己伸展力を、数値解析に反映（実験値を一時的に理論から求まる値と置換）することで、解析結果と実験結果の合わせ込みを行った。

一方、ブームが剥離することなく伸展する領域では、一定の速さで伸展しており、この定性的な展開特性は、実験結果と数値解析結果において一致することから、提案した解析方法が妥当であると判断できる。

解析結果と実験結果の誤差は、Figure 10 に示した通り、最大で 17mm 程度であるが、これはブームの剥離が起きる領域での数値であり、剥離現象をモデル化できていないことが、大きな誤差を招いていると言える。また、ブームの剥離が起きて以降も誤差として 15mm 程度を記録しているが、これは伸展したブーム長の 5%にも満たない。このことから解析の有効性が見て取れる。

膜面を取り付けた場合の実験結果（Fig.9-No.3）を見ると、膜面を取り付けていない実験結果に対して、展開が遅れることなく同様の挙動を示していることが分かる。つまり、回転二重折りによる折り目剛性の影響は微小であり、展開挙動に与える影響は、ブームの自己伸展力とダンパによる反トルクの大きさが支配的であると判断できる。

5. 結論

本研究では、下記の結果を得た。

- 3N3B トラス構造を対象として、自己展開時のダイナミクスを定式化した（式(20)）。
- 実験結果および数値解析結果より、螺旋状に巻き取られたブームが一定の速度で伸展することが分かり、解析結果の妥当性が確認できた。

本稿では、3N3B トラス構造を対象としたが、同様の解析方法により、コンバックステープを用いた様々な形式の自己展開挙動を把握することが可能だと考えられる。今後の課題としては、剥離現象のモデル化が挙げられる。

謝辞

本研究は、文科省・科研費 15H04204 および宇宙航空科学技術推進委託費・宇宙科学研究拠点形成プログラムの補助を受けて行われました。

参考文献

- [1] Patrick Harkness, Malcolm MacRobb, Ross Milligan and Craig Clark : Deployment Dynamics of AEOLDOS - An Aerodynamic End Of Life DeOrbit System for CubeSats, AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition, AIAA 2014-4340, 2014
- [2] S.Nasir Adeli and Vaios Lappas : Deployment System for the CubeSail nano-Solar Sail Mission, Proceedings of Small Satellite Conference, SSC10-VIII-3, 2010, pp.1-12
- [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, pp.1-6
- [4] 井上翔太, 田村明寛, 宮崎康行 : BCON ブームを用いた自己展開トラス構造の構造特性, 第 57 回構造強度に関する講演会講演集, JSASS-2015-3036, 2015, pp.96-98
- [5] 村田亮, 井上翔太, 宮崎康行 : 宇宙構造物の伸展部材用コンバックステープの展開挙動, 第 56 回構造強度に関する講演会講演集, JSASS-2014-3018, 2014, pp.45-47
- [6] Yasuyuki Miyazaki, Shota Inoue, Akihiro Tamura : Analytical solution of the bending of bi-convex boom, Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No.6, Paper No.15-00465, 2015.