

BCON ブームを用いた自己展開トラス構造の設計法

Design Method of Self-Deployable Truss Structure Consisting of BCON Booms

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

高坂大樹

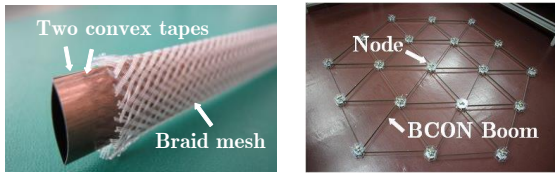
Daiki Kousaka

In recent years, studies on deployable members for gossamer structures and structural members for next generation large space structure are actively conducted. The self-deployable boom that consists of convex tapes is one of the candidates for the member of such structures. However, the design method of the self-deployment force and efficient storage has not been established yet. In this paper, a conceptual model designed with a geometric method was created for a truss structure composed of Braid Coated Bi-Convex Booms, which is a combination of two convex tapes. Besides, the validity of this design method was assessed.

1. 序論

1.1. 背景

Fig.1(a)に示す組紐被覆バイコンベックス(Braid Coated Bi-Convex:BCON)ブームは比剛性や収納性に優れ^[1], 高自己伸展力を有することから, 大型宇宙構造物への応用が期待されてきている. そこで我々は, BCON ブームを用いた7つのノードと12本のブームを用いた自己展開トラス(7N12Bモデル)や, Fig.1(b)に示すような19N42Bモデル等の概念モデルを提案してきた^[2].



(a) BCON boom (b) 19N42B model
Fig.1 Self-Deployable Truss Structure

Fig.1(a)で示したBCONブームは素材にステンレス鋼を用いているが, 炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic:CFRP)のような複合材料を用いたブームも開発されている^[3]. BCONブームを用いたトラス構造の利点として, 展開後, 軌道上外乱に耐えうるだけの高いロバスト性を有し, 非同期展開が可能である^[2]. また, 剛性が高いため, 軌道上での展開挙動の模擬が地上で容易であるという点が挙げられる.

しかし, 現状ではBCONブームを含む自身の弾性を利用した自己伸展部材については, 自己伸展力, 効率の良い収納・展開方法, そのときの必要な収納体積等を明確化した設計手法が確立していない. また, 複合材料による自己伸展部材の場合, 収納時に応力緩和により自己伸展力が減少することが問題となっているが, これを解決する方法, あるいは, 自己伸展力の減少の予測理論が確立されておらず, これを用いた構造物を設計することが困難となっている.

1.2. 本研究の目的

本研究では, 1.1節で挙げた自己伸展部材を用いた構造物の問題点の中で, 効率の良い収納方法を検討していく. 具体的な手順としては, 幾何学的手法を用いた数値計算により設計を行い, 筆者らが従来から用いてきた自己伸展構造を組み合わせる概念モデルを製作し, その収納・展開実験を行うことで, 設計

手法の妥当性を検証する.

2. 概念モデルの設計

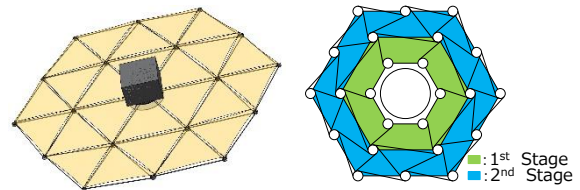
2.1. 設計条件

本研究ではFig.2(a)に示すように, 50kg級超小型人工衛星に搭載することを前提とした自己伸展トラス構造の概念モデルの設計を行う. 設計条件は次の通りである.

- ① 概念モデルは24N42Bモデルであること.
- ② モデル中心に直径240[mm]の中空円筒が存在する.
- ③ Fig.2(b)のような2段式の多段構造とし, Fig.3のように, ノード1, 2, 3はモデル中心からの放射線上に存在する.
- ④ 円筒近傍周辺には, 収納・展開状態に関わらず, ノード中心座標がモデル中心から150[mm]のノードが6個存在し, それらは60[deg]間隔である.
- ⑤ Fig.3のようにノードに対し番号付けをする.
- ⑥ 各ブーム長さを, ノード要素*i, j*間の長さ L_{ij} [mm]と定義し, 対称性から式(1)のようになる.

$$L_{12} = L_{67}, L_{23} = L_{56} \quad (1)$$

- ⑦ 収納状態は600[mm]四方に収めること.
- ⑧ 展開状態は最大径4400±100[mm]に収めること.



(a) Image loaded on satellite (b) Multistage structure
Fig.2 Concept model

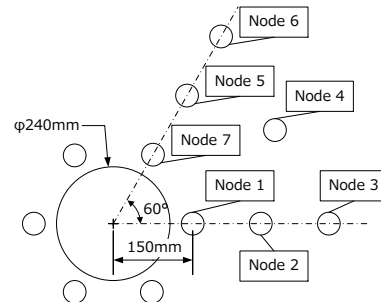


Fig.3 Design condition

これらの条件から最終的に求めたい解は各BCONブームの長

さである。長さが分かれば、各ハブの取り付け角度は図面上で求められ、概念モデルの製作は可能である。単にこのパラメータを把握したいのであれば、展開後のノードの位置を適当に決定するだけで求められる。しかし、これらのみでは収納時の形状を把握することが不可能である。そこで、収納時の形状を把握するために必要な条件を以下に挙げる。

- ① 各ノードのハブに巻き付けられた BCON ブームの長さが求められる。
- ② ハブに巻き付いた、あるいは巻き付いていない BCON ブームが、他の BCON ブームに干渉しない。
- ③ 各ノード位置が求められる。
- ④ ハブに巻き付いていない BCON ブームが直線である。

これらの条件を満たす解を求めていくことにより、同時に展開後のパラメータ・形状が決定していくことになる。2.3 節より、具体的な幾何学的設計手法を記述していく。

2.2. 自己伸展構造

概念モデルに採用しているノードの構造は、これまで製作されてきた 7N12B や 19N42B で用いてきた Fig.4(a)のような構造と同様のものであり、Fig.4(b)に組立図を示す。概念モデルのノードの仕様を Table 2 に示す。BCON ブームにおいては、従来の SUS301 製ではなく、一般に市販されているコンパクステープを用いており、組紐の代替としてポリイミド膜とカプトンテープから自作したテープを採用している。従来の BCON ブームと同様に、筒状のハブに巻き付けられた状態から、自らの弾性力によりハブから離れようとする力で自己伸展する。そして、ガイドローラーを設置することによって BCON ブームの伸展方向を任意で設定することが可能である^[4]。また、ノード位置によってハブの形状を変更する必要はない。しかし、本研究における概念モデルではトラス形状が正三角形ではないため、BCON ブームの取り付け角度がノード毎に異なり、その該当箇所の変更は必要である。また、従来のノード形状は正六角形であったが、こちらも一様ではない。これらの理由は 2.4 節で説明する。

ここで、Table 2 のハブ基準半径は従来の BCON ブームの仕様に基づいて算出されている。この値は BCON ブームの曲率半径よりも大きく、且つ保持状態において BCON ブームの巻き付け状態が安定している条件下で決定する。一般にテープスプリングを曲げた時、曲げの半径 a' とテープスプリングの曲率半径 R' がほぼ近い値の時に準安定状態になることが知られている。曲率半径間の角度が一定のまま曲げた時の歪エネルギーが最小になる点を準安定点と考え^[9]、曲げの半径を算出し、ハブ基準半径は仕様のように決定された。



(a) Components of node (b) Assembly drawing
Fig.4 Node structure

Table 1 Specification of BCON boom

Plate thickness	0.15mm
Width when deployed	15.19mm
Thickness when deployed	4.51mm
Curvature radius	14.56mm
Convex tape material	Steel
Coated material	Kapton tape Polyimide film

Table 2 Specification of node

Basic node shape	Circle
Main material	Node : acrylic Hub : PLA resin
Oil less damper	Model number : ADV-S-10 Torque value : $10 \pm 2.5 \text{ mN} \cdot \text{m}$
Total height (other than shaft)	54.70mm
Hub reference radius	18.75mm

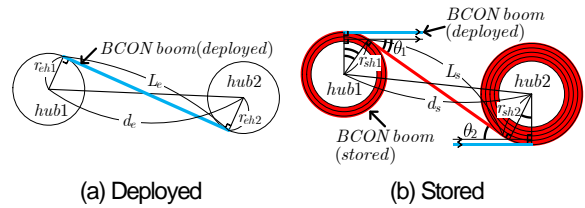
2.3. 幾何学的設計手法及び設計手順

本節における添え字 s は収納時、 e は展開時を示す。

- i) ノード間距離

Fig.5(a)を例とすると、ノード間距離 d_s は、式(2)のようになる。

$$d_s = \sqrt{(r_{sh1} + r_{sh2})^2 + L_s^2} \quad (2)$$



(a) Deployed (b) Stored
Fig.5 Inter-node relationship

- ii) 収納・展開時のブームの長さ

ハブに巻き付けられたブームの長さは、展開時のブーム取り付け位置を基準とした基準巻き付き長さ b_e と、Fig.5(b)より展開時と収納時でブーム角度 θ が生じているので、この θ によって生じた巻き付き長さ b_θ の2つを足し合わせた長さとなる。よって、hub1 に関する添え字を 1、hub2 は 2 とすると、式(3)の関係が得られる。

$$L_e = L_s + b_{e1} + b_{\theta1} + b_{e2} + b_{\theta2} \quad (3)$$

- iii) 収納・展開状態の相対するノードの角度関係

Fig.5(b)より、hub 1 及び hub 2 に巻き付いていないブームが直線状態にある時、収納状態は安定している。この時の条件として、式(4)が成り立つ。

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (4)$$

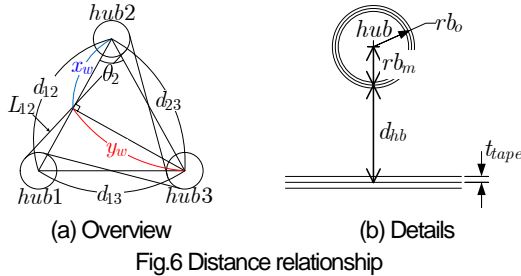
実際の計算においては、式(4)が成り立つことは困難で、 θ_1 及び θ_2 の差の許容値を設定し、収束計算を行う。

- iv) ノード自らに関連しないブームとの距離関係

Fig.6(a)より、 d_{i2} の垂線 y_w を求める距離とすると、

$$\begin{cases} x_w = \frac{d_{i3}^2 - d_{i2}^2 - d_{i23}^2}{2d_{i2}} \\ y_w = d_{i23} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{d_{i3}^2 - d_{i2}^2 - d_{i23}^2}{2d_{i2}d_{i23}} \right) \right) \end{cases} \quad (5)$$

となる。この距離関係と既知のハブの位置座標から未知の座標を算出する。この時、厳密には L_{12} の端までが正しい距離だが、ハブの半径未満まで近くなるとブームに食い込んでしまうので、ハブの半径を限界値とする。計算時にはFig.6(b)のようにハブの半径は最外周のブーム中心までの距離 r_{bm} 、ハブからブームまでの距離 d_{hb} は最外周のブーム中心から相対するブーム中心までとする。



次に、これら幾何学的手法を用いて数値計算を行う。計算手順としては、

- ① 変数の初期値及び定数を把握する。
- ② どのパラメータが不明かを洗い出す。
- ③ 未知数の設定を行う。
- ④ 複雑化を防ぐため、基本はノード単位で計算を行う。
- ⑤ 計算を行うノードの順番は、そのノードに関わるすべてのパラメータが明確化されるものから行う。

以上の5手順が基本となる。本概念モデルでは、ノード4に取り付けられている L_{24} , L_{34} または L_{45} , L_{46} どちらかのパラメータ計算を行うと、もう片方の組み合わせの計算結果に誤差が必ず出てしまう。そこで、 L_{24} , L_{34} を最終的な収束計算の対象とし、このブームの誤差を0にするために、未知数をTable 3のように設定し、最急降下法でこれらの値を決定した。

Table 3 Unknown parameter (stored)

d_{12}	Distance between nodes 1 and 2.
d_{23}	Distance between nodes 2 and 3.
η_{45}	The winding ratio of the nodes 4 to 5.
$d_{4L_{25}}$	Distance between nodes 4 and boom L_{25} .
d_{46}	Distance between nodes 4 and 6.

距離に関する未知数は、すべて収納時のブームの厚みを基準としたパラメータになっており、計算を行う前に上限値・下限値を設定しておくことで、ブーム4, 5の誤差に制限をかけることが可能である。このように、最も重要な手順③である未知数の設定を行っている。残りの手順に関しては、先ほど示したi)項からiv)項の幾何学的設計手法を適用させつつ、数値計算を行っていく。計算において、ブームの厚みが分かれば理論上では巻き付け長さ、ハブに巻き付けられたブームの厚み、巻き付いていないブームの長さが分かるが、実際には差が出るため、実測データを計算に用いた。

2.4. 設計手法に基づく24N42Bモデルの計算結果

2.3節の手法を用いて数値計算した結果、各ノードの位置座標はTable 4のように、各BCONブームの長さはTable 5のように求められた。Fig.7(a)より求められた収納時の形状が、2.1節⑦項の設計条件を満たしている。加えて、Table 4及びFig.7(b)より、展開時の最大径が4421.15[mm]となり、2.1節⑧

項の設計条件を満たしている。

Table 4 Coordinate of node

State	Stored		Deployment	
	Node No.	x[mm]	y[mm]	x[mm]
1	150.0	0	150.0	0
2	199.6	0	1200.5	0
3	252.7	0	2201.2	0
4	157.8	172.0	1729.1	1064.8
5	99.8	172.9	600.3	1039.7
6	126.3	218.8	1100.6	1906.3
7	75.0	129.9	75.0	129.9

Table 5 Boom length

Boom	Length[mm]	Boom	Length[mm]
L_{12}	1049.9	L_{25}	1200.0
L_{23}	1000.0	L_{45}	1128.5
L_{34}	1164.2	L_{46}	1049.6
L_{24}	1188.2		

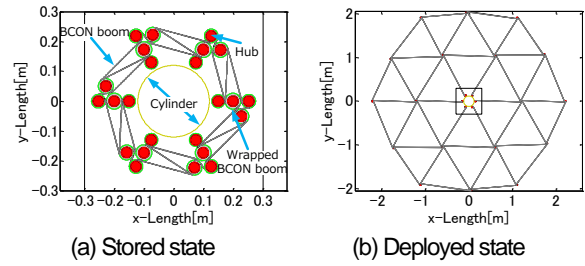


Fig.7 24N42B model

収納状態の形状より、次のようにしてノードの形状を決定することができる。すなわち、まず収納状態のノード座標、BCONブームの巻き付け長さを考慮したハブ外径、ノード間のBCONブームの角度、展開状態のノード間のBCONブームの角度を反映した図面を作成する。次に、この図面を基準として、ノード形状は収納しやすいよう回転角に余裕を持たせるため、形状は円形を基本とし、ノード間で干渉しないように設計する。ノード形状が設計できたならば、ガイドローラーをBCONブームの可動範囲に存在しないよう、配置を行う。以上のことと収納状態の形状から、ノード形状が従来の正六角形にならない。

2.5. 保持解放機構

トラスの保持・展開方法は、従来から用いられているテグス切断式と側面を抑え込む方式を組み合わせた保持解放機構を採用した。テグスを切断すると、ゴムの縮む力で側面パネルが上昇し、展開機構が解放される機構である。ただし、展開機構外側からテグスを切断すると、実験者に供試体が接触する可能性があるため、モデル中心の円筒部に実験者を配置する。

3. 計算結果と実験結果の比較及び考察

3.1. 3N3Bモデル及び7N15Bモデル展開実験

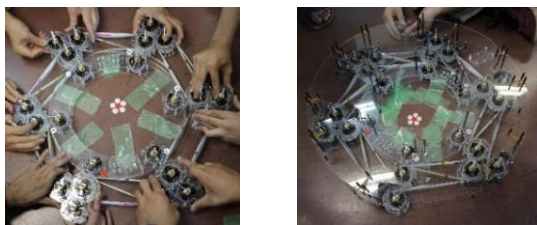
3N3Bモデルでは、ノード設計の妥当性を検証した。ノード2, 3, 4を用いて製作し、展開実験を行った。結果として、収納に問題はなかったが、展開時に本来BCONブームが存在するはずの空間から剥離を起こした。

この結果を踏まえて、すべてのBCONブームが存在すれば剥離は起きないと考え、7N15Bモデルの実験を行った。この実

験では、剥離問題に加えて、収納が可能かを検証した。複数回実験を行い収納は問題なかったが、一部で剥離現象が発生し、完全展開しなかった。剥離現象については、ガイドローラー間の間隔が空きすぎていたことや、ノード機構が上下からナットでハブを締め付ける機構であり、このナットが緩んだことでダンパーによる角速度の抑制が解けたことが原因として考えられる。

3.2. 24N42Bモデル収納状態

3.1 節の結果を踏まえ、ノードの改良を行い、保守性を再考し、24N42Bモデルの展開実験を行った。製作した24N42Bモデルを収納状態にしたものをFig.8に示す。Fig.7(a)とFig.8を定性的に比較すると、ノード1, 2, 3がモデル中心からの放射線上に存在し、且つノード4の位置がノード2, 3近傍の適切な位置に収納されていることが分かる。また、BCONブームに着目すると、すべてのBCONブームがノード間の距離に対して余ることなく直線である。つまり、各ノードに対するBCONブームの巻き付き量が適切であると言える。したがって、2.3節の幾何学的設計手法を用いた設計は妥当である。



(a) by hand (b) by retention release mechanism

Fig.8 Stored state of 24N42B model

ここで、Fig.8(a)の収納状態から、人為的な力が加わっていない状態にしたものをFig.9に示す。Fig.9から分かる通り、各ノードが僅かに展開している。これは、BCONブームの弾性力によって螺旋状態から定常状態に戻ろうと僅かに伸展し、ノードを回転させてしまうことにより発生した現象であると考えられる。この現象を防止するには、Fig.8(b)の様に展開機構外側から抑え込む方法や、ノード上部の機構を改良し、軸の回転を抑制できるような保持解放機構を取り入れなければならないと考えられる。実際にSSPS等に適用するのであれば、抑え込む機構は振動に対して脆弱であるので、軸不動の保持解放機構が必要となる。



Fig.9 Stored state of 24N42B model (free)

収納時、ノード2の巻き取りにおいて非常に大きなトルクが発生していた。BCONブームの伸展力から軸の回転トルクが発生しているのは明らかだが、単にBCONブームの伸展力だけではなく、巻き取り時のBCONブームの形状が螺旋状態であり、これを要因とする力が働いていたと考えられる。軸トルクは収納状態において重要なパラメータであるので、今後明らか

かにする必要がある。

3.3. 24N42Bモデル展開実験

24N42Bモデルの展開実験を実施した。実験時の展開挙動はビデオカメラにて記録したので、時系列化した静止画をFig.10に示す。展開は2.8[sec]で完了しており、本設計手法を用いた概念モデルの展開が問題ないことを確認した。

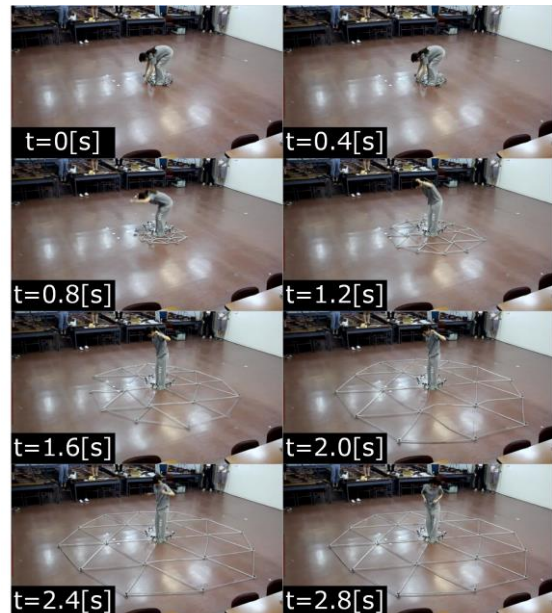


Fig.10 Deployment behavior of 24N42B model

4. 結論

本稿では、次のような結論を得た。

- ・ 24N42Bモデルの収納・展開状態は条件を満たしており、設計に用いた幾何学的設計手法は有効である。
- ・ 24N42Bモデルが自己展開可能であることを確認した。
- ・ 実測値の反映を行うことで設計の精度が向上した。
- ・ 軸に対する保持解放機構の設計が必要である。
- ・ 実験時の保守性に対して改善が必要である。

以上のことから、今後は宇宙実証モデル実現を視野に入れ、保持解放機構の詳細設計やノード構造の改良などが課題として挙げられる。加えて、幾何学的手法のみの設計であったので、力学も加味した設計手法を提案する必要がある。

謝辞

本研究は文科省・科研費 15H04204 の補助を受けて行われました。

参考文献

- [1] 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, JSASS-2012-4496, 2012年.
- [2] Shota Inoue, Akihito Tamura, Noboru Tada, and Yasuyuki Miyazaki, Dynamic Characteristics of Self-Deployable Structure Consisting of Tape Springs, 30th ISTS, 2015-c-21
- [3] 渡邊秋人, 堀利行, 伊藤裕明, 組紐被覆ブームの軽量化検討, 第57回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2013-4679, 2013年.
- [4] 井上翔太, BCONブームを用いた自己展開トラス構造の展開性評価, 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.
- [5] 宮崎康行, BCONブームの曲げ理論, 第56回構造強度に関する講演会, JSASS-2014-3019, pp48-50, 2014年8月6日~8月9日