

# 自己伸展ブームを用いた立体トラスの概念設計とその構造特性

Concept of Three-dimensional Truss Using Self-extensible Boom and It's Structural Characteristics

指導教授 宮崎 康行

M6012 河原林 大思  
Daishi Kawarabayashi

In recent years, large scale space structures of several hundred meters or several kilometers have been receiving much attention from all over the world. High efficiency for storage, lightweight member and adaptation to complicated shape are required to such large space structures. Under such requirement, engineering feasibility of convex tape has studied, and, bi-convex boom combined with 2 convex tapes and braid or band has been proposed. This paper proposes a three-dimensional truss using a self-extending boom and describe its structural characteristics.

## 1. 序論

### 1.1. 背景

宇宙空間に大型な構造物を建造する案は 40 年以上前から考えられている。例として、Fig.1 のような宇宙太陽光発電がある(SSPS: Space Solar Power System)。これは宇宙空間に太陽から絶えず広範囲に放出されているエネルギーを全長数 km に及ぶ受光面によって集め、発電し地球に送電するものである。この宇宙太陽光発電は 1968 年の peter E. Glaser が提案したのが最初といわれている<sup>[1]</sup>。このような数km級の大型構造物の提案は現在も考えられており“SPS Alpha”, “Fresh Look” などがある<sup>[2,3]</sup>。



Fig.1 SSPS: SPS Alpha (left), Fresh Look (right)

上記で述べた構造物は、技術的な課題があり、実現には至っていない、もしくは開発が困難なものが多い。

### 1.2. 大型構造物の技術的課題

大型宇宙構造物を実現するためには以下の課題がある。

- ・展開構造物である(高い収納効率)  
ロケットの貨物室の容量制限から、貨物室の充填率を上げる高収納な構造様式が必要である。
- ・曲面を有する複雑な形状への対応  
SSPS のような複雑な形状への対応が必要である。
- ・展開形状の保持(高比剛性構造)  
提案されている構造物は、展開後の形状がある程度保持されていることから、比較的高い剛性が必要になる。そのため基礎構造は立体トラスで構成されると考える。
- ・宇宙空間での組み立て方法  
大型宇宙構造物は宇宙空間で複数回に分けて組み立てることからモジュール同士を宇宙空間で結合することが必要である。

### 1.3. 自己伸展部材

1960 年から STEM(Storable Tubular Extendible Member) と呼ばれる薄肉閉断面の伸展ブームが登場し<sup>[4]</sup>、その後 TRAC(Triangular Rollable And Collapsible)<sup>[5]</sup>や薄肉閉断面 CTM(Collapsible Tubular Mast)<sup>[5]</sup>の等が登場している。近年、

収納性や比剛性などに優れた組紐被覆バイコンベックス (Braid Coated Bi-Convex: BCON) ブーム<sup>[6]</sup>や、バンドで離散的に覆う Bi-Convex ブーム<sup>[4]</sup>が提案されている(Fig.2)。

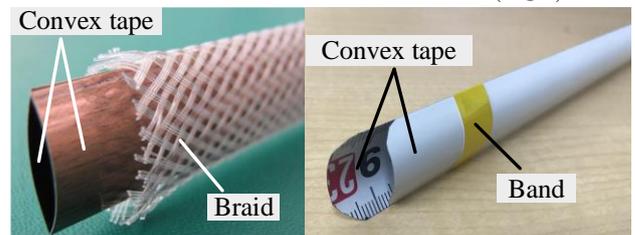


Fig.2 BCON boom (left) Bi-Convex boom (right)

BCON と Bi-Convex は、2つのコンベックステープを凸面を外を向くようにエッジを重ね合わせ、その周りを組紐もしくはバンドで覆う構造となっている。この組紐の拘束力によりエッジ同士は離れることなく閉断面を維持でき、1枚のテープよりも剛性が高く、ねじりに強い構造となる。また、収納性においても、円柱に巻きつけて収納することで、テープ同士が軸方向へずれ内外収差を吸収することができ、極めて効率の高いとも言える。

## 2. 研究目標

今までに考案された自己伸展部材を用いた展開構造物は、直線的もしくは平面的に展開するものがほとんどであり、三次元的に自己展開する構造は提案されていない。そこで

- ・三次元的に自己展開する展開構造物の提案
- ・その収納効率、展開挙動、座屈に関する評価を行う。これにより本研究では、1.2節で述べた収納効率、複雑な形状への適応、展開形状の保持に関する課題を解決する。

## 3. 三次元的に自己展開する展開構造物の提案

### 3.1. 自己伸展ブームを用いた立体トラス

本研究では、三次元的に展開する方式として、自己伸展部材を用いた自己展開型立体トラス(以下、3D Bi-Convex Truss、略して 3D-BCON と呼ぶ)を提案する(Fig.3)。

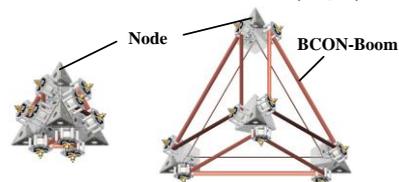


Fig.3 3D-BCON: Stored configuration (left), Deployed configuration (right)

3D-BCON は、平面的に自己展開する展開構造物を立体的に組み合わせることで、三次元的に自己展開することが可能となる。今回は、基本的なモデルとして Bi-Convex ブームを用いた正四面体構造のトラスを考える。3D-BCON の中で平面的に展開する部分を Fig.4 に示す。以降、平面的に展開する部分を 3N3B(3 nodes 3 booms)と呼ぶ。3N3B は BCON ブームとノードで構成されている。ブームはノードの中にあるハブ(円柱)に巻きつけることで収納されている。また、ブームは伸展過程でハブの角速度が速くなりすぎると、ハブから剥離し展開しないことが理論的・経験的に知られており、ハブの回転数を抑えるために、ロータリーダンパを取付けている。

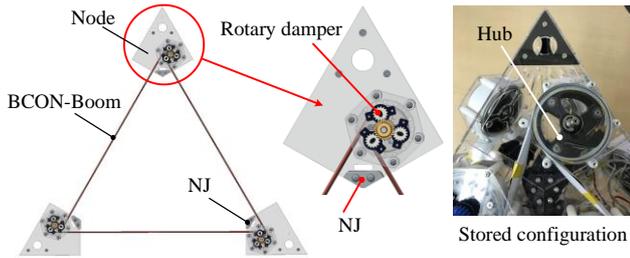


Fig.4 3N3B

Fig.4 の 3N3B は、Fig. 5 に示す PJ(Pyramid Joint)により立体的に組み合わせられる。

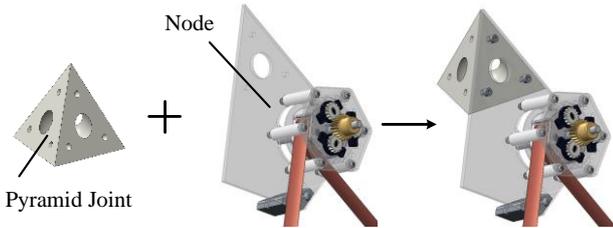


Fig.5 Attachment of node to Pyramid Joint

この展開構造物は、3N3B の形状と PJ の形によって構造全体の形状が決定する。つまり、複雑な形状であっても 3N3B の形状と PJ の形を変えることで構築ができる。

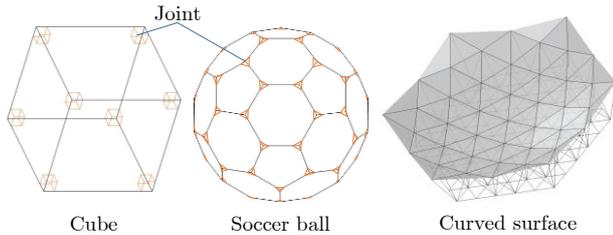


Fig.6 Example of self-deployable truss

例えば、Fig.6 に示すように、4N4B であれば直方体ができ、5N5B と 6N6B を組み合わせればサッカーボール(切頂二十面体)が作れる。さらに複数の形状を組み合わせれば、曲面形状も近似的に作る事が可能である。

### 3.2. 保持解放機構

多くの展開構造物は、展開のためにモータのようなアクチュエータが必要であるが、自己伸展型の展開構造物はそれを必要としない。しかし、自己展開構造では収納してから実際に展開するまでの間、ブームが伸展することを防ぐ必要がある。例として提案したモデルは、収納時に生じる三角錐の内部空間内に Fig. 7 の赤丸で囲んだ保持解放機構が各 3N3B に一つずつ、計 4 つ取り付けられている。この保持解放機構

は、Fig.4 の各ノードに取り付けた 3 つの NJ (Node joint)を Dyneema®で束ねることで展開を抑制している。Fig. 7(右)の保持解放機構の拡大図から、NJ の一つにニクロム線が取り付けられているのが分かる。このニクロム線は Dyneema®と接触しておりニクロム線が加熱されることによって Dyneema®が溶断され保持されていた 3N3B が展開する。また、これを制御する基板がノードに取り付けられている。

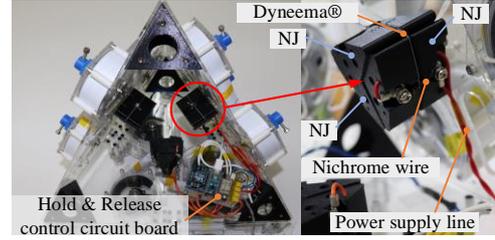


Fig.7 Hold & Release system of 3D-BCON

## 4. 収納効率

提案したモデルの収納効率を算出する。

### 4.1. ハブに巻き付けられたブームの長さ

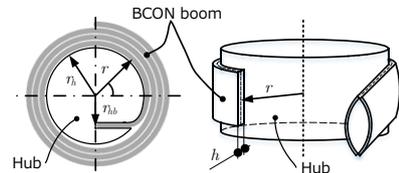


Fig.8 BCON boom wrapped around the hub helically

Fig.8 に示すように BCON ブームはハブに螺旋状に収納していると仮定する。 $r_h$  をハブ半径、 $r_{hb}$  をブーム取り付け半径、ブーム厚  $h$  とすると、ブームを巻き付け後の半径  $r$  は、

$$r = r_h + \frac{h}{2} + \frac{\theta}{2\pi} nh \quad (1)$$

となる。この時、ハブに巻き付けたブームの長さ  $l$  は、

$$l = \int_0^{\theta} \sqrt{\left(r_h + \frac{h}{2} + \frac{\theta}{2\pi} nh\right)^2 + \left(\frac{nh}{2\pi}\right)^2} d\theta \quad (2)$$

$r_h + \frac{h}{2} + \frac{\theta}{2\pi} nh = \frac{nh}{2\pi} y$  とすると、

$$l = \frac{nh}{2\pi} \int_{y_0}^{y_b} \sqrt{1 + y^2} dy \quad (3)$$

となる。 $y = \sinh x$ ,  $dy = \cosh x dx$  と置換すると(4)式となる。

$$\begin{aligned} l &= \frac{nh}{2\pi} \int_{x_0}^{x_b} \sqrt{1 + \sinh^2 x} \cosh x dx \\ &= \frac{nh}{2\pi} \left[ \frac{x}{2} + \frac{\sinh x \sqrt{1 + \sinh^2 x}}{2} \right]_{x_0}^{x_b} \end{aligned} \quad (4)$$

### 4.2. 収納時のノードサイズ

まず、ノードを Fig.9 のような形状になるように決める。展開した状態のブームの頂点を  $B_p$  とする。ノードの頂点 A, B は  $B_p$  を通る。 $R$  はガイド半径  $r_g$  と巻き付け半径とガイドとの隙間  $d_{gap}$  と収納時の巻き付け半径  $r_b$  を含む。

$$R = 2r_g + d_{gap} + r_b \quad (5)$$

ノードの辺の長さは(6)式となる。

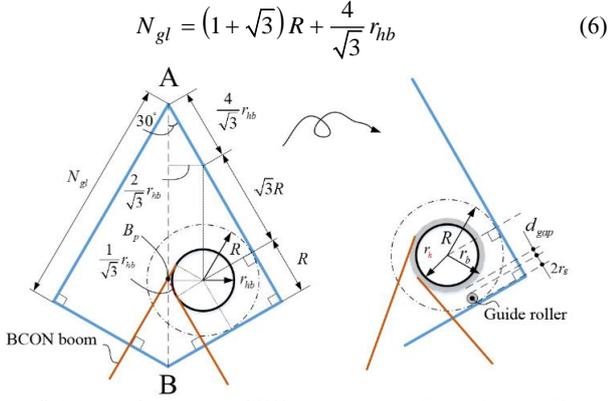


Fig.9 Node: Deployed BCON boom configuration (left), Stored BCON boom configuration (right)

Fig.10 のように、ブームをハブに巻き付けていくと形状的に巻き付けができないブーム長さ  $l_{rem}$  が出てくる。

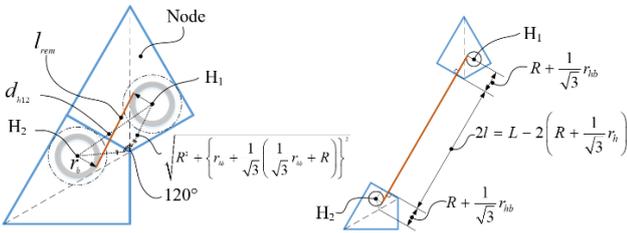


Fig.10 Geometric relationship between  $l_{re}$  and  $H_1, H_2$  (left), Geometric relationship between  $l$  and  $H_1, H_2$  (right)

ハブ 1, 2 の中心間距離は

$$d_{h12} = \sqrt{4R^2 + \frac{8}{\sqrt{3}} R r_{hb} + \frac{16}{3} r_{hb}^2} \quad (7)$$

巻き付けられない長さは以下ようになる。

$$l_{rem} = \sqrt{d_{h12}^2 - 4r_b^2} \quad (8)$$

長さ  $L$  のブームを巻き取ると

$$2l + l_{rem} - L = 0 \quad (9)$$

となる。  $x$  をニュートン法により求めれば、巻きつけ半径がわかり、ノードの収納時の辺の長さ  $N_{gl}$  が決まる。

### 4.3. 収納効率の代表長さの決定

収納効率を出すために代表寸法  $d_s, d_d$  を決める。今回は 3D-BCON 全体を包む正四面体を考え、その一辺を代表寸法とする。

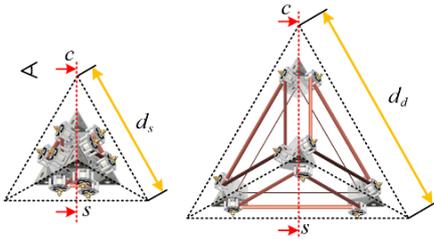


Fig.11 Characteristic Length of storage efficiency

ここで、断面 c-s を考える。  $a$  はノードの高さ  $h_n$  を考えないときの四面体 1 辺の長さである。 Fig.12 よりノード高さ  $h_n$  を考慮した、四面体一片の長さ  $d$  は

$$d = \frac{1}{\sin \alpha} \left( 2a \sin \alpha + \frac{h_n}{\cos \beta} + h_n \right) \quad (10)$$

となる。

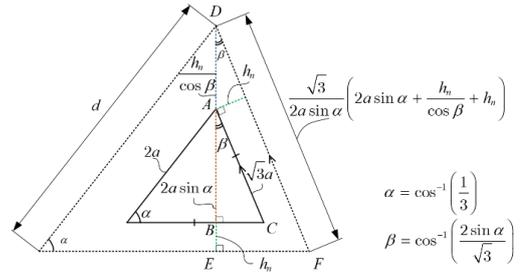


Fig.12 Cross section c-s

収納時  $d_s$  は

$$d_s = 2N_{gl} + \frac{h_n}{\sin \alpha \cos \beta} + \frac{h_n}{\sin \alpha} \quad (11)$$

となる。ただし  $a = a_s = N_{gl}$  である。展開時の  $d_d$  は

$$d_d = 2N_{gl} + L - 2 \left( R + \frac{1}{\sqrt{3}} r_{hb} \right) + \frac{h_n}{\sin \alpha \cos \beta} + \frac{h_n}{\sin \alpha} \quad (12)$$

となる。ただし  $a = a_d$  とすると

$$a_d = N_{gl} + \frac{L}{2} - \left( R + \frac{1}{\sqrt{3}} r_{hb} \right) \quad (13)$$

となる。以上より、収納効率は(14)式ようになる。ただし、 $\eta_l$  は相似比、 $\eta_s$  は面積比、 $\eta_v$  は体積比である。

$$\eta_l = d_d / d_s, \quad \eta_s = (d_d / d_s)^2, \quad \eta_v = (d_d / d_s)^3 \quad (14)$$

3D-BCON の形状は、ブームをハブに巻き取ることで、面積比なら 2 乗、体積比なら 3 乗に比例するが、ハブ径  $r_h$ 、ブームの取り付け半径  $r_{hb}$ 、ノード高さ  $h_n$ 、ブーム厚  $h$ 、ガイド半径  $r_g$  は、ブームの種類によって変化する。また、ブームの巻き付け本数  $n$  は、展開形状によって変化する。ただし、隙間  $d_{gap}$  は、ブームの種類、展開形状に影響されない。

### 4.4. 収納効率の解析

収納効率を Table.1 に示したパラメータで計算する。このパラメータは、5 章で使用する実験モデルのものである。ただし実験モデルのブーム長さ  $L$  は 430mm である。また、実機の収納効率は、 $\eta_{pl} = 1.935, \eta_{ps} = 3.745, \eta_{pv} = 7.246$  であった。この時の計算値は、 $\eta_p = 1.940, \eta_{ps} = 3.763, \eta_{pv} = 7.300$  であり、相対誤差は、0.26%, 0.48%, 0.74% である。

Table.1 Parameters of 3D-BCON

$r_h = 18.75 [mm]$	$h_n = 56 [mm]$
$r_{hb} = 16 [mm]$	$n = 2$
$r_g = 4 [mm]$	$d_{gap} = 4.6 [mm]$
$h = 0.8 [mm]$	$L = 1 [m]$ まで巻き付け

計算結果は以下のグラフとなる。

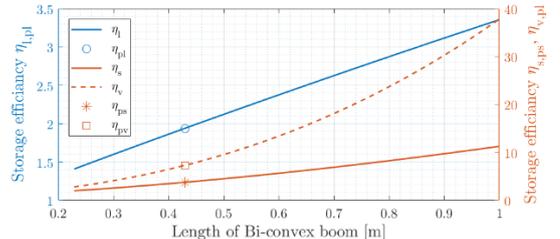


Fig.13 Storage efficiency

#### 4.5. 収納効率の考察

Fig. 13 より、収納効率は巻き取る長さが長いほど効率よく大きな構造を作ることができ、大型宇宙構造物に適しているといえる。η<sub>i</sub> は η<sub>l</sub> の三乗に比例するため、3D-BCON は、三次元的に広がりを持った構造物に対して高い収納効率を発揮することが分かる。また、収納時の 3D-BCON は、内側に空間があり、この空間に保持解放機構や膜面や折り畳みパネルなどミッション機器を収納可能である。実際に 5 章のモデルは、保持解放機構が内部に組み込まれており、誤差 1% 以内で計算と一致する。ただし、Fig.14 の赤線で囲まれた実験治具インターフェースは除く。

#### 5. 3D-BCON の微小重力下における展開実験

3.1 節で述べた 3D-BCON が実際に展開可能か、またその展開挙動を評価するために、Fig.14, Table.1 に示すモデルを利用し、航空機を用いた無重力環境での展開実験を行った。その結果を Fig.15, Fig.16 に示す。

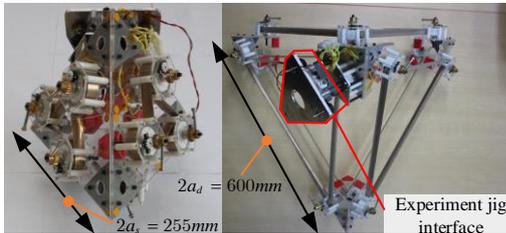


Fig.14 Experiment model



Fig.15 Deployment experiment of 3D-BCON

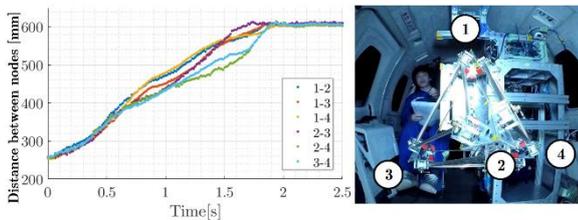


Fig.16 Time history of distance between nodes of pair(left), Node number(right)

#### 5.1. 展開時意見の考察

Fig.15 から視覚的に展開が完了していることが分かる。さらに Fig.16 から、1.8[s] 付近でノード頂点間距離がすべて 600 mm に収束しているため展開が完了したことが分かる。このことから 3D-BCON は、自己展開が可能な三次元トラスモデルであることが示された。また、Fig.16 よりこの程度の展開の非同期性があっても、ブームが弾性変形することにより、展開可能であることがわかる。さらに、1.9 秒近傍で、ほぼ同時に展開が終了していることがわかる。このことから、展開完了時は同期がとれる自己伸展構造となっていることもわかる。

#### 6. 自己伸展ブームのオイラー座屈荷重

本研究で提案したモデルはトラス構造をしており、この構造は基本軸力のみで荷重を支える骨組構造である。いま、仮

に提案した自己展開トラスに、膜面のような柔軟な構造を取り付けるとする。その膜面をピンと張った状態で形状を維持することを考えると、膜の張力にブームが耐えなければいけない。このことから座屈荷重を超えない設計が必要である。したがって、ブームの座屈荷重を知ることが展開後の形状保持を評価するための重要なパラメータであると考えられる。

座屈荷重  $P_{cr}$  を両端単純支持と仮定すると、

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (15)$$

となる。実際に作用する荷重を  $P_{max}$ 、安全率  $s_f$  とすると  $P_{max} s_f < P_{cr}$  から、座屈しないブーム長さ  $L$  は

$$L < \pi \sqrt{\frac{EI}{P_{max} s_f}} \quad (16)$$

となる。4 章より収納効率は、巻き取るブームが長いほど高くなることを示したが、(16)式は、それを制限するものである。収納効率を高くするためには、 $P_{cr}$  を大きくする、すなわち、曲げ剛性の高いブームを選択する必要がある。しかし、このブームの良い点は、座屈による破壊は起きず、荷重が 0 になれば元に戻る性質があることである。そのため、一時的な形状変形を許すことで収納効率を高くすることが可能な点である。

#### 7. 結論

本研究の結論を以下に示す。3 章の三次元自己展開構造の提案により複雑な形状への対応が可能である。4 章では提案したモデルの収納効率は三次元的に広がりを持つ大型構造物に適した高収納な構造様式であることが示された。また、提案したモデルは、5 章より、展開が可能であること、特に、展開の非同期性があっても、ブームが弾性変形することにより展開可能であることが示された。さらに、展開完了時に同期がとれる自己伸展構造であることが示された。最後に 6 章より、ブームの座屈荷重は展開後の形状保持および収納効率を評価するための重要なパラメータであることが示された。

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] Glaser, P. E. "Power from the Sun; It's Future", Science, 162, 1968, pp.857-886.
- [2] John C. Mankins, "SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array", [https://www.nasa.gov/pdf/716070main\\_Mankins\\_2011\\_PhI\\_SPS\\_Alpha.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/716070main_Mankins_2011_PhI_SPS_Alpha.pdf), 2012.
- [3] John C. Mankins, "A fresh look at space solar power: New architectures, concepts and technologies, 1998.
- [4] Richard I. Bourgeois-Doyle, "George J. Klein: The Great inventor", National Research Council Canada, 2004 pp.219
- [5] Jeremy A. Banik, Thomas W. Murphey "Performance Validation of the Triangular Rollable and Collapsible Mast" AIAA/USU 24<sup>th</sup> Conference on Small Satellites, 2010, SSC10-II-1, pp.1-8
- [6] 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.