

バイコンベックスブームを用いた立体トラスの設計と展開の研究

Research on three-dimensional truss design using Bi-Convex booms and deployment

宮崎・山崎研究室

Miyazaki・Yamazaki Laboratory

河原林大思

Daishi Kawarabayashi

In recent years, large space structures such as Space Solar Power Systems (SSPS) has been proposed. For large space structures, high efficiency for storage and lightweight member is required. Under such requirement, engineering feasibility of convex tape has studied, and, bi-convex booms combined with 2 convex tapes and braid has been proposed. In this study, to grasp the possibility of deployment of a three-dimensional truss model.

1. 緒言

近年、宇宙開発において宇宙太陽光発電システム (Space Solar Power Systems : SSPS) にみられる数 km 級の大型宇宙構造物の検討がなされている (Figure 1) [1,2]. 現在ある大型構造物には国際宇宙ステーション(ISS)があるが、SSPSのような数 km 級の大型構造物の実現には技術レベルに差がある。

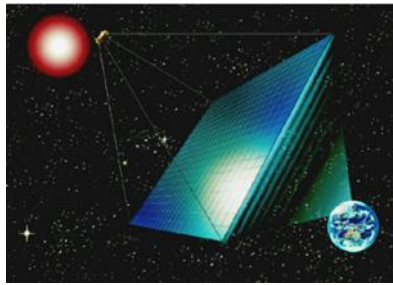


Figure 1 SSPS [2]

このような大型構造物の実現に向けて、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) が提案され [3], 大型宇宙構造物への応用が期待されている。BCON ブームを用いた概念検討モデル [4] としては、7Nodes 12Booms(7N12B)モデル、19N42B 等が製作されてきた (Figure 2)。

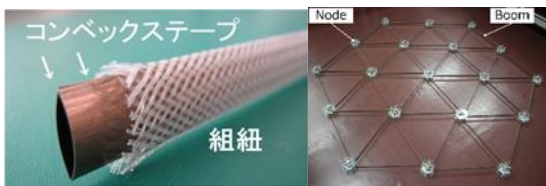


Figure 2 BCON boom (left), 19N42B model (right) [4]

今までの BCON ブームを用いた概念検討モデルは平面的な展開しかなく、3次元的な展開をするモデルはなかった。平面的な展開モデルは大型化するにつれ剛性が低くなるため、Figure 3 のようなバックストラクチャーを入れ剛性を高くする必要である。

そこで、本研究では3次元的な展開をするモデル(立体トラスモデル)を製作し、宇宙空間での展開の可能性を航空機がパラボリックフライト (放物線飛行) することで得られる微小重力環境にて把握する。

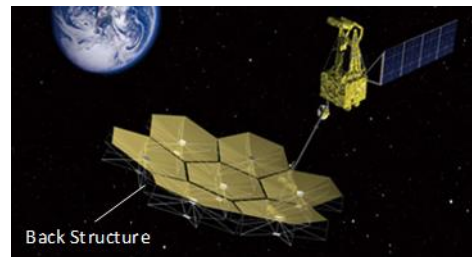


Figure 3 ASTRO-G: example of back-structure [5]

2. 立体トラスモデル

2.1 立体トラスモデル概念設計

本研究で用いる展開機構については、正四面体型の立体トラス (以後、3D-12N12B と呼ぶ) の自己展開トラス (Figure 4) を用いることとする。

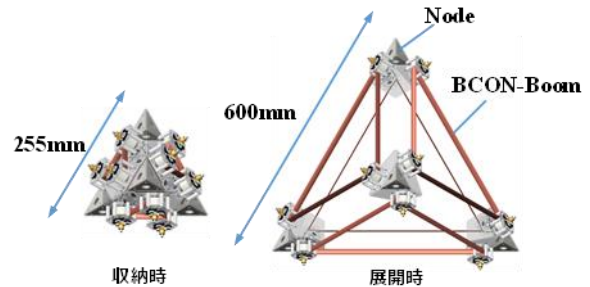


Figure 4 3-D truss model

正四面体構造は、空間を最小数の平面で囲んでできる多面体のため、最も堅固で最も安定している [6]。これより本研究では立体トラスの基本モデルとして正四面体構造を用いることにした。

2.2 3D-12N12B 実機

3D-12N12B モデルの総重量は1.869kg。Figure 5 に収納時、展開時を示す。さらにノード1つの分解図を Figure 6 に示す。BCON はハブに取り付けてあり、ハブを回転させることで巻き付け収納をしている。

3D-12N12B モデルに使用した BCON ブームの仕様を Table 1 に示す。

また Figure 7 に示すように、各ノードにはロータリーダンパーをつけ、センターハブの回転を抑制している。用いたロータリーダンパーの定格トルク値は、Table 2 の通りである。

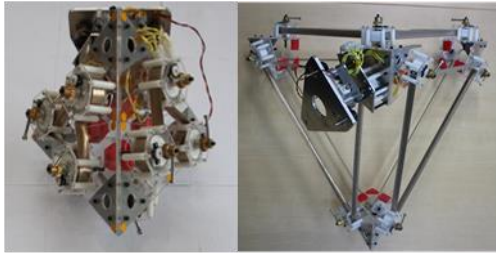


Figure 5 3D-12N12B: stored configuration (left), deployed configuration (right)

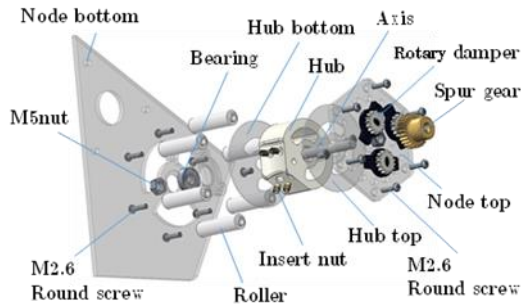


Figure 6 Illustrated parts breakdown of node

Table 1 Property of BCON boom

長さ	440 mm
板厚	0.10 mm
曲率半径	16.62 mm
主要材料	bi-convex : SUS301 組紐 : PFA モノフィラメント
ブーム総質量	13.26 g

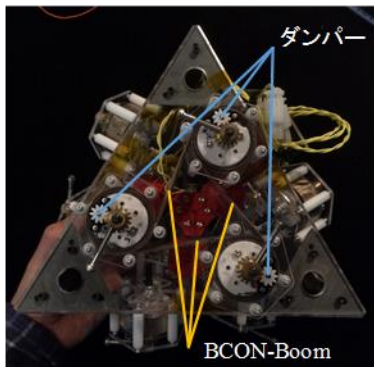


Figure 7 Attachment of rotary damper

Table 2 Rated torque of rotary damper

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

2.3 展開機構

展開機構は Figure 8 に示すようになっている。各ノードはダイニーマで固定されている。ダイニーマはニクロム線と接触しておりニクロム線が加熱されるとダイニーマが溶断され展開される。

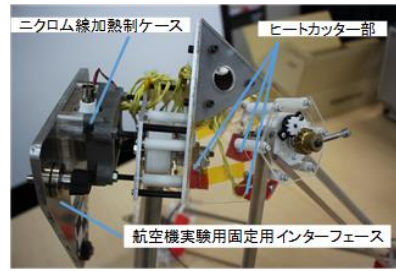


Figure 8 Deployment mechanisms

ニクロム線加熱制御ケースは Figure 9 のようになっている。電源ピンに 12[V] を出力する電池ボックスが接続されている。BNC に 4.8[V] を印加するとリレースイッチが動作しニクロム線に 12[V] が供給され、ノードを固定していたダイニーマを溶断する。以下に本実験のシステムダイアグラムを Figure 10 に示す。

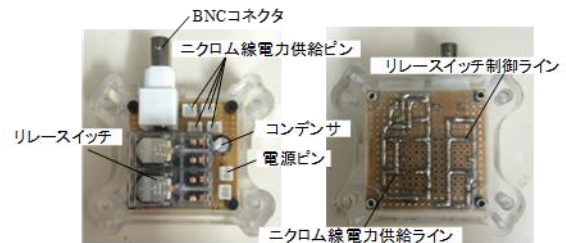


Figure 9 Control box of heat cut system using Nichrome wire

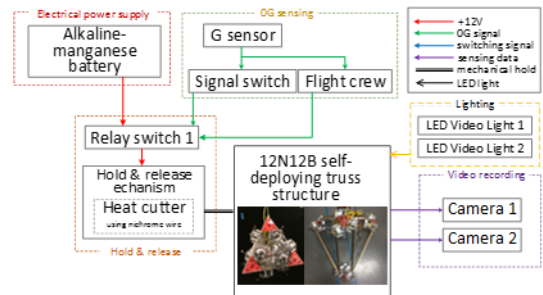


Figure 10 System diagram of μ G experiment

3. 展開実験

3.1 実験環境

宇宙環境を模擬するため微小重力下での実験を行った。微小重力形成手段は、主に落下塔、航空機、ロケット、軌道上宇宙船がある^[7]。各微小重力の比較を Figure 11 に示す。今回は人が直接実験できる航空機を用いる。航空機の微小重力の質は 10^{-2} から 10^{-3} 程度で約 20 秒間の微小重力環境を形成する。

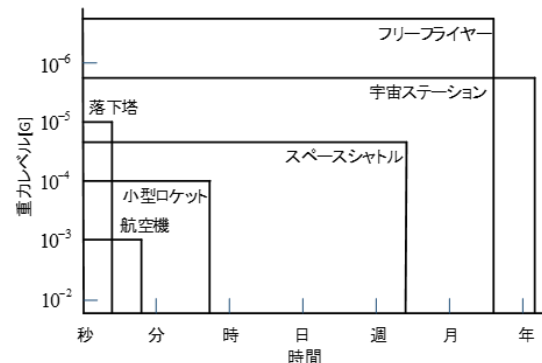


Figure 11 Comparison of micro-gravity environment^[7]

3.2 実験装置

本実験では、ダイヤモンドエアサービス社⁸⁾のMU-300 小型双発ジェット機を用いる。機体軸は以下 Figure 12 のようにとする。

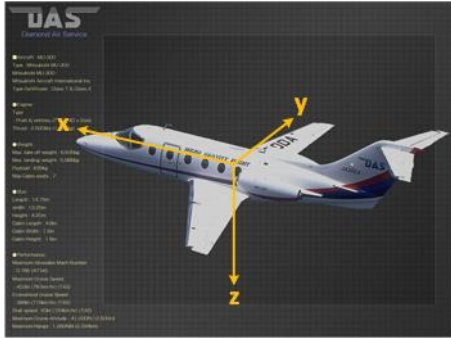


Figure 12 Body axis of airplane⁸⁾

航空機内の実験装置は Figure 13 のように配置されている。

3D-12N12Bの実験は、ラック1ラック2の間にある比較的大きな空間で展開実験を行う。

展開の様子は Gopro カメラを2台使用しステレオ視撮影を行う。撮影速度は80fps。また、データロガー(GLS20)により航空機の加速度、微小重力検知フラグを計測している。微小重力検知フラグは航空機よりもらい、微小重力が2秒間続くとフラグが立ち約20秒間それを維持する。

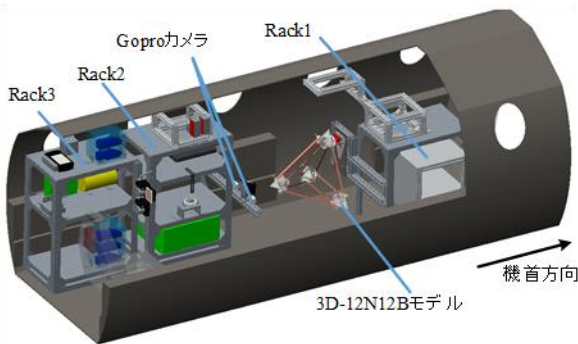


Figure 13 Configuration of experiment in airplane

3.3 実験結果

以下にデータロガーの計測データを示す。Figure 14は微小重力検知のフラグが立ち上がってから4秒間の機体加速度を示している。

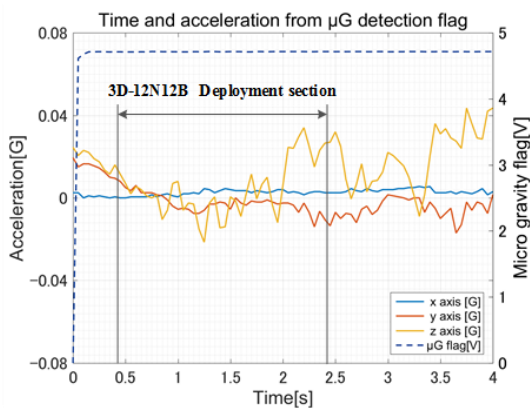


Figure 14 Time history of acceleration in body coordinate after micro-gravity detection flag is activated

展開開始時刻は微小重力検知フラグから0.425秒後の展開であった。展開所要時間は、約1.8秒であった。展開中の微小重力の質を Table 3 に示す。Table 3 より微小重力の質は 10^{-2} から 10^{-3} 程度に収まっており、航空機で求められる微小重力の質であった。

Table 3 Minimum and maximum value of acceleration

	x 軸[G]	y 軸[G]	z 軸[G]
最小値	0.000	-0.014	-0.0215
最大値	0.0045	0.0195	0.034

微小重力下での3D-12N12Bモデルの展開の様子を Figure 15 に示す。展開開始を0[s]としている。

また、Figure 16の①から④の頂点をステレオ視により3次元復元し各頂点の距離を算出することでBCON-Boomが最後まで展開しているかを確認した。3D-12N12Bの展開が完了すると各頂点の距離が600mmになる。3次元復元の結果を Table 4 に示す。

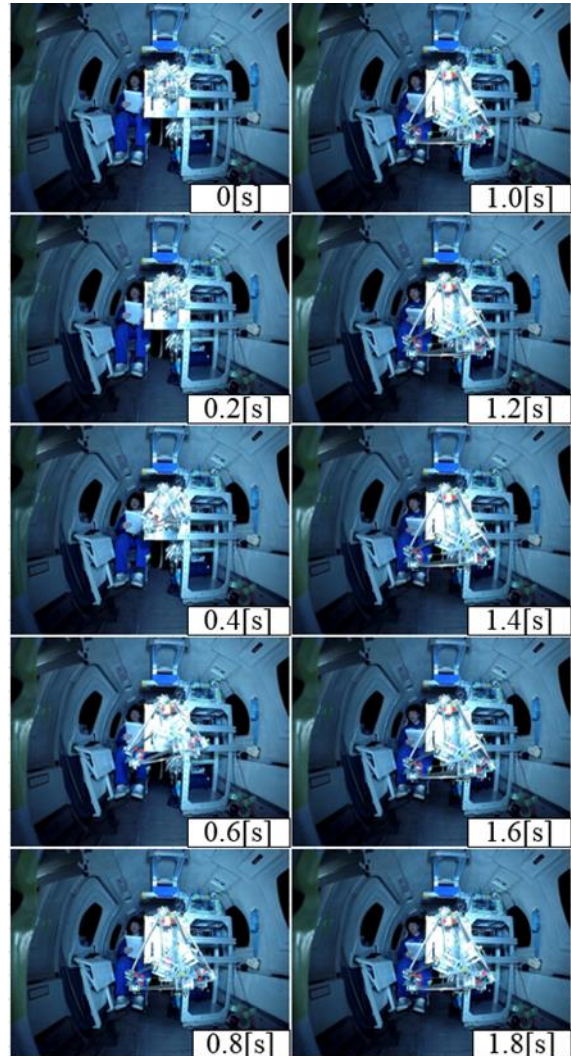


Figure 15 Deployment of 3D-12N12B (left cam)

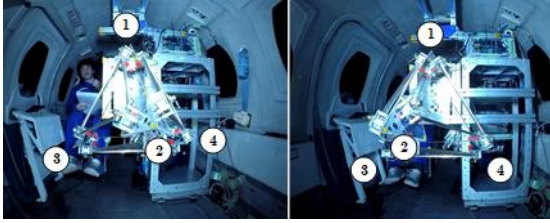


Figure 16 Node number: left cam (left), right cam (right)

Table 4 Distance between nodes

Vertex distance	Length [mm]
1-2	603.8
1-3	605.5
1-4	608.1
2-3	600.6
2-4	600.6

3.4 考察

Figure 15 の0.2[s]から頂点3が先行して展開している。0.6[s]から0.8[s]にかけて頂点2, 4が追って展開している。展開は0.8[s]程で完了し、展開後1.0[s]から1.8[s]は共振している。頂点3が先行して展開したのはニクロム線によるダイナミカによる溶断が同時に行われなかったことが原因であると考えられる。このことから各ノードの展開にズレが生じても展開可能であることが示している。

設計値と各頂点間距離の差を Table.5 に示す。

Table 5 Difference between designed and measured value of nodal distance

Vertex distance	Remainder [mm]
1-2	3.8
1-3	5.5
1-4	8.1
2-3	0.6
2-4	0.6

頂点間距離、2-3、2-4は設計値と0.6mmほど違うが、製造誤差であると考えられる。

頂点間距離1-2、1-3、1-4は、設計値より3.8mm~8.1mm長くなっている。Figure 14のデータロガーの値を見ると、1.8[s]~2.5[s]の間でx軸、y軸に比べz軸方向に0.034[G]と少し強めのGがかかったためBoomが伸び設計値より長くなった可能性があると考えられる。

Table 4、Table 5よりBCON-Boom最後まで展開していると考えられる。このことから微小重力環境化での3D-12N12Bモデルの展開は実現可能であると言える。

4. 結言

本研究では、以下の結果を得た。

1. 微小重力環境化での3D-12N12Bモデルの展開は実現可能であることが示された。
2. 多少の同期生のズレが生じても展開可能であることが示された。

今後は、展開途中の3次元位置復元を行い、展開挙動を把握する。また、2次元的な展開では出にくい、BCON Boomのね

じれによる展開の影響を明確にしたい、最終的には、剛性の評価、温度による変形等もまとめていきたい。

参考文献

- [1] Sasaki, S., et al., "A New Concept of Solar Power Satellite: Tethered-SPS", Acta Astronautica, 60, 2006, 153-165.
- [2] 上土井大助, 他, 「宇宙太陽光発電システム用大型構造物へのSTEM構造の適用性検討」, 第57回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2013-4479, 2013.
- [3] 渡邊秋人, 他, 「組紐を被覆した伸張構造物の検討」, 第56回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2012-4496, 2012.
- [4] 田村明寛, 他, 「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, 132-134.
- [5] 後藤健, 他, 「ASTORO-G型大型展開アンテナの技術実証活動」, 第56回構造強度に関する講演会講演集, JSASS-2014-3047, 2015, 96-98.
- [6] 村上一三, 「美しい多面体—その理論と組み立て方—」, 明治図書, 1982, 8-9.
- [7] 小田原修, 「軌道上実験概論」, 海文堂, 2000, 22-28.
- [8] ダイヤモンドエアサービス社:
http://www.das.co.jp/new_html/service/01.html.