

バイコンベックスブームを用いた自己伸展機構の研究

Research on self-extension system using Bi-Convex booms

宮崎研究室

田村 明寛

Abstract: 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, a self-deployable truss using bi-convex booms is proposed and its conceptual model is developed and evaluated.

1. 緒 言

近年、宇宙太陽光発電システム（Space Solar Power Systems : SSPS）にみられる大型宇宙構造物の検討がなされている。2012年には無線送電モジュールだけで1kmにも及ぶSSPSであるSPS-ALPHA（図1）の提案がなされている^[1]。国内では、2013年の宇宙基本計画において、将来の宇宙開発利用の可能性を追求する3つのプログラムのひとつとして、宇宙太陽光発電研究開発プログラムが掲げられた^[2]。

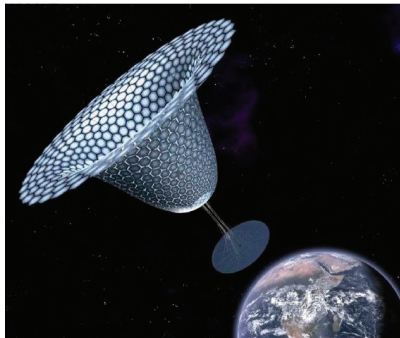


図 1 SPS-ALPHA^[1]

しかし技術的な課題として、大型構造物を宇宙空間へ輸送し組立て、維持する技術等が挙げられており、既存の技術では困難とされている。そんな中、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 Caoted 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としては、7Nodes 12Booms(7N12B)モデル等が製作されてきた。

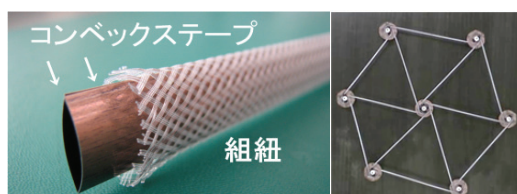


図 2 BCON ブーム(左)と 7N12B モデル(右)

また、SSPS に向けた反射鏡として 100m 級での構造適用性も検討されており（図3）、今後はノード、ブームともに数を増やした大型の展開構造の検討が不可欠となる。

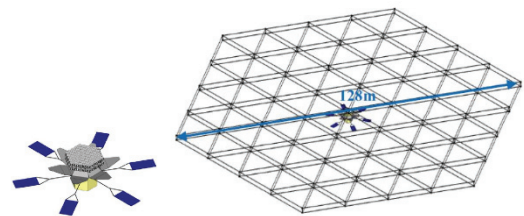


図 3 反射鏡への適用検討例^[4]

そこで、本研究では BCON ブームを用いて、従来の展開実験モデルに対しより大型となるモデルを製作し、実際の展開実験により、その展開を実証するとともに、非同期展開時における展開可能性等を把握することとする。

2. 展開実験モデル

2-1. 展開機構概念

本研究で用いる展開機構については、19N42B の多段自己展開トラスを用いることとする。

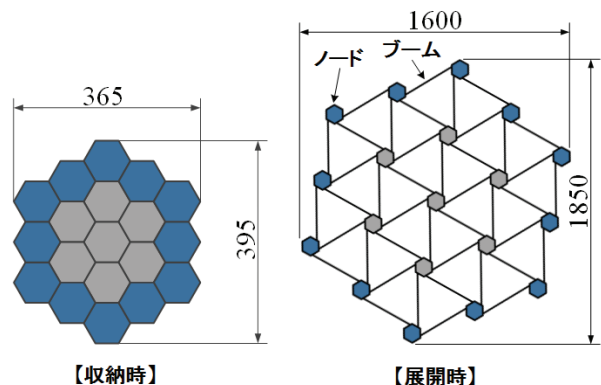


図 4 19N42B 多段自己展開トラス

19N42B モデルは、既存の 7N12B（図 4 のグレー部分のみの）モデルよりもひと回り大きい構成となり、2m 弱の多段式トラス構造となる。

また、過去の展開実験^{[4][5]}では、展開時の解放を、展開機構の周囲に巻いてあるゴムや紐等を切断するという方法で行われてきた。この方法では、切断箇所からゴムに沿って徐々に解放されていくことになる。よって、収納時における外周が大きくなればなる程、解放の同期性に影響が出るものと考えられ、今回は、図 5 に示す展開機構の解放機構も導入することとした。

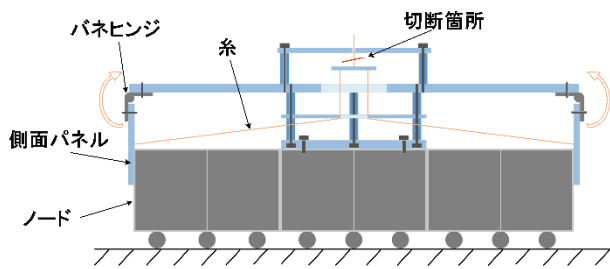


図 5 解放機構概念図

この解放機構では、最も外側に位置するノードの側面を、バネヒンジを取り付けた側面パネルで抑え込み、それぞれのパネルの内側を糸で引っ張り、糸を中央部に集約する。そして、その集約箇所を切断し、全てのパネルを同時に解放することで、バネヒンジによりパネルが展開し、トラスが自己伸展を始める。

2-2. 展開機構仕様

19N42B モデルに使用した BCON ブームおよびノードの仕様は表 1、2 の通りである。

表 1 BCON ブーム仕様

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
boom 総質量	13.26 g

表 2 ノード仕様

ノード形状	正六角形
ノードサイズ	長辺 : 91.2 mm 短辺 : 79.0 mm 高さ : 62 mm
伸展時ノード軸間距離	440 mm
質量 (boom を除く)	490 g
主要材料	ケース : アクリル センターハブ : PLA 樹脂

また図 6 に示すように、各ノードにはセンターハブの回転を抑制するため、ロータリーダンパーをつけてある。

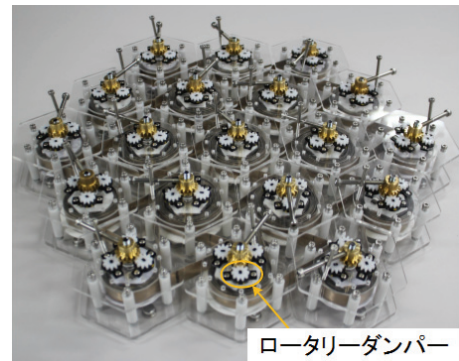


図 6 19N42B 収納状態

用いたロータリーダンパーの定格トルク値は、表 3 の通りである。

表 3 ロータリーダンパー定格トルク値

	型式	定格トルク [N・m]
①	FRT-G2-600	$(6 \pm 1.2) \times 10^{-3}$
②	FRT-G2-101	$(10 \pm 2) \times 10^{-3}$

各ノードのダンパー取り付け個数であるが、ブームを 6 本収納している中央の 7 つのノードには、②を 3 個、また、一番外側に位置しており、ブームを 3 本あるいは 4 本収納しているノードには①を 1 個、②を 2 個取り付け実験を行った。

解放機構については遠隔操作による解放を可能にできるように、図 7 に示す基板を取り付け、マイコン制御によりニクロム線ヒートカッターにて、解放動作を行える仕様とした。

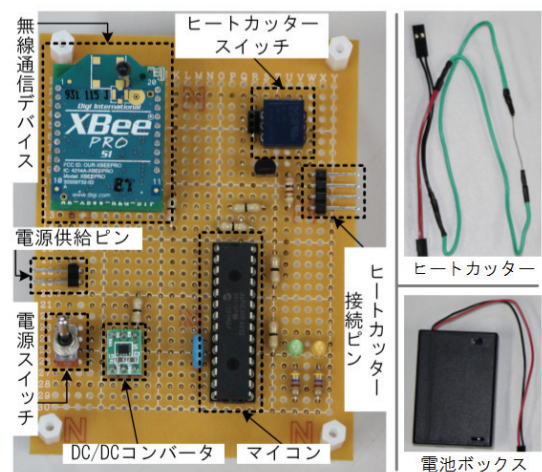


図 7 解放制御基板

BCON ブームをノードに収納し、解放機構を実装した様子が図 8 である。

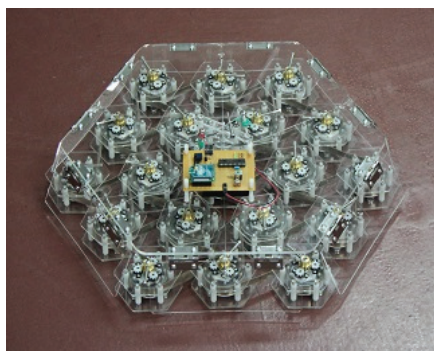


図 8 19N42B 収納時の様子

3. 展開実験

3-1. 展開結果と挙動

製作した 19N42B モデルの展開試験を実施し、その様子をビデオカメラにて撮影した。ここでは、撮影映像をコマ送りで切り取り、静止画にしたものを図 9 に示す。

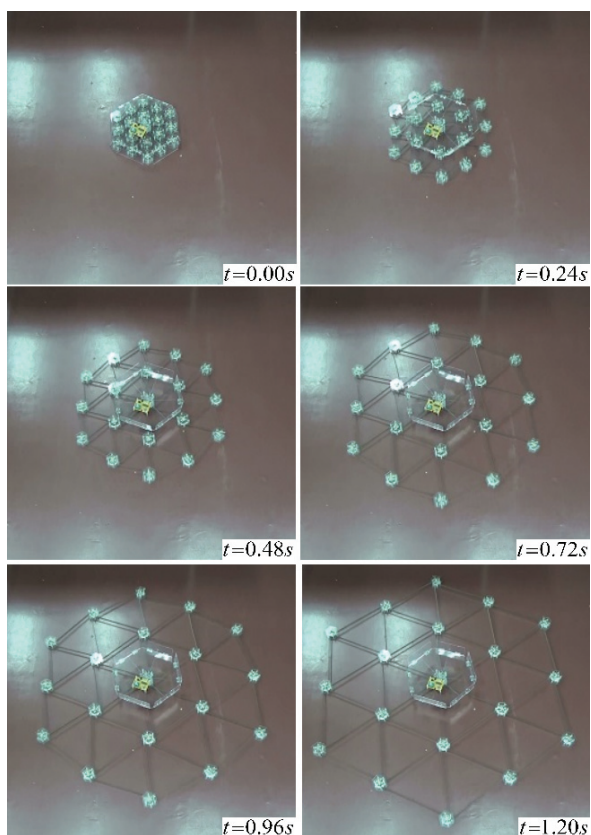


図 9 解放機構を有する場合の展開過程

次に、従来通り展開機構の外周を紐で結び、ハサミで切断したことによる展開結果を図 10 に示す。

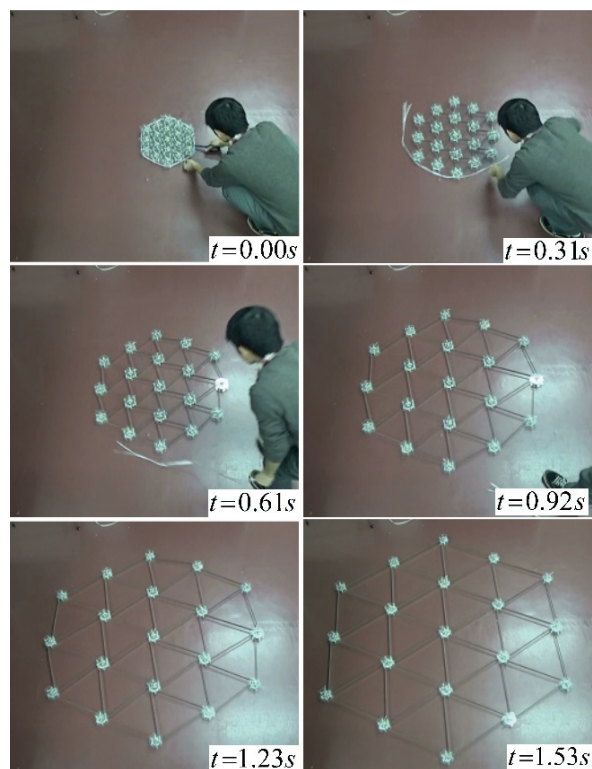


図 10 解放機構を有さない場合の展開過程

最後に、スタックした場合を考え、簡略的ではあるが、ノードひとつにおいてセンターハブの回転を保持して展開した場合の結果を図 11 と 12 に示す。

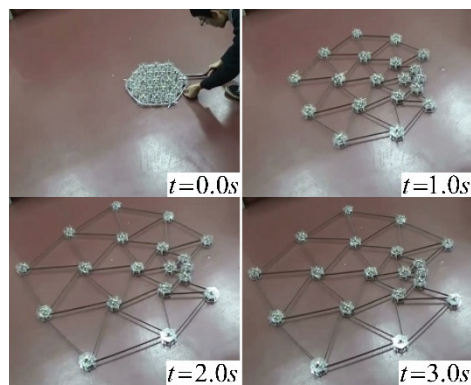


図 11 ハブの回転保持した場合の展開挙動

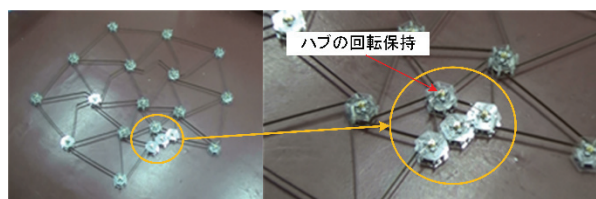


図 12 ハブの回転を保持したノード付近

上記の展開不完全状態で収まった状態から、ハブの回転を解放した場合、図 13 の通り展開するという結果が得られた。

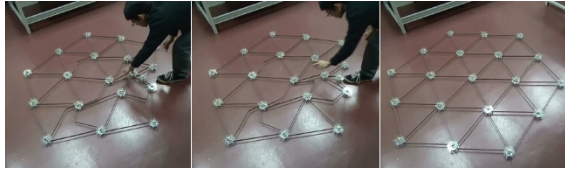


図 13 ハブの回転を解放した場合

3-2. 考察

今回、解放機構を用いて行った実験では、解放からおよそ $1.2s$ で展開するという結果を得た。各ノードの自己伸展スピードであるが、撮影映像からは、BCONブームを4本収納しているノードが、僅かではあるが他のノードに比べ最も速く展開が終了しているように見て取れた。それに対し、ブームを3本収納しているノードが最も遅く展開を終了していることがわかった。

また、完全に展開した状態に比べると、展開途中の全体の形状は、正六角形よりも、やや丸みがかっているように見える。これは、ブームを4本収納しているノードが、やや先行して伸展していることに起因すると考えられ、同期して展開していないことを表していると言える。

解放機構を有さないで展開を行った場合では、展開までは、およそ $1.53s$ という結果を得た。また、この場合も解放機構をつけた場合と同様に、ブームを4本収納しているノードが先行して展開を終えている。ただし、この現象は、図9の $t=0.96s$ および図10の $t=1.23s$ からも見て取れるように、解放機構を有するものに比べて大きく、同期性は解放機構を有する場合に比べ劣ることがわかる。

両者ともに、各ノード間で同期して展開はしていないものの、最後まで展開する結果が得られた。また同期性に差が生じる結果となったが、同期性に関しては、解放直前直後の状況が影響していると考えられる。特に、解放機構を有さない場合は、構造全体として、正六角形であるが為に、展開直後には、外周を結んでいる紐の影響を受けるのは、ブームを3本収納しているノードであると考えられ、ブームを4本収納しているノードに対して、伸展の妨げになる影響が大きいと考えられる。また、各ノードについて、センターハブに生じるトルクを考えた場合、ブームを4本収納しているノードの方が、3本のものに対して、およそ1.33倍強くなると考えられ、同時に解放した場合でもノード間での伸展スピードに差が出るものと思われる。

最後に、ハブの回転を保持したまま展開を行った例であるが、全く展開しないということはなく、図11のように展開不完全状態で伸展挙動は落ち着く結果となった。ただし、この状態での展開機構は非常に不安定であり、手で触れるなど外力を加えた場合、構造の形状を維持できない特徴がある。また、図13に示した通り、改めてハブの回転を解放した場合、展開機構は

完全に伸展することが確認できた。

本研究で製作した19N42Bモデルにおいては、展開解放時の方法により展開挙動の差は見られたが、非同期時においてもスタックしない限り、最終的には完全に展開し得ることがわかった。

4. 結 言

本研究では、以下の結果を得た。

- BCONブームを用いて19N42Bの多段自己展開トラスを製作し、自己展開することを確認した。これにより、多段の自己展開トラスが実現可能であることが示された。
- 非同期展開時における展開実現を確認した。これにより、提案するトラス構造は、従来の展開トラス構造の多くにおいて問題となっていた同期性の確保を必要としない、より展開信頼性の高い構造であることが示された。
- 解放機構の試作を行い、その有無による展開過程の差を把握した。これにより、解放機構を有することで、従来の解放様式に比べ、展開時の同期性が改善することが示された。

以上のように、本研究では、BCONブームを用いた多段自己展開トラスの定性的特徴を実験により確認した。今後は、定量的な評価を行い、設計手法の確立を目指す。また、展開過程において、ノード内部でブームがスタックしないためには、適切なロータリーダンパーを設計する必要がある。そのためには、展開過程におけるノード内部の状況を詳細に把握する必要がある。そこで、高速度カメラによる観察等を行っていく。

参考文献

- [1] John C. Mankins, et al., "SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array", AIAA 2012-3978, 2012
- [2] 内閣府 宇宙開発戦略本部 宇宙基本計画, 2013
<http://www8.cao.go.jp/space/plan/plan.pdf>
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 井上翔太, 鈴江隼太: 「コンベックステープを用いた自己伸展展開システムの研究」, 日本大学理工学部卒業論文, 2013