

# A11 組紐被覆 Bi-Convex ブームによる膜面構造物の展開挙動

博田真矢, 生田寛幸 (早稲田大), 奥泉信克, 名取通弘 (JAXA/ISAS)

渡邊秋人 (サカセ・アドテック), 山川宏 (早稲田大)

Shinya Hakata, Hiroyuki Ikuta (Waseda Univ.), Nobukatsu Okuizumi, Michihiro Natori (JAXA/ISAS),

Akihito Watanabe (Sakase Adtech) and Hiroshi Yamakawa (Waseda Univ.)

## 1. 緒言

膜面展開構造物は、軽量で高い収納効率が実現可能であり、ソーラーセイルやドラッグセイルといった膜面構造物が近年世界的に数多く研究開発されている<sup>(1-9)</sup>。膜面の展開方法は、ブーム展開型と遠心力型の2通りに大別される。小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS<sup>(9)</sup>で実現された遠心力展開型は、大型化には適しているが、常時回転による運用上の制約や膜面形状の安定性などの問題があり、地上展開実験も困難である。ブーム展開型は、将来の大型化には不向きとされるが、安定な構造で汎用性があり、地上展開実験も可能なため、セイルだけでなく、太陽電池アレイや平面アンテナなど、様々な用途への発展可能性がある。

著者らは、ブームと膜面を一体で巻き付け収納し、ブームの弾性エネルギーによって断続展開する膜面展開構造物の概念を提案している<sup>(10-12)</sup>。シンプルな展開機構による断続展開によって、ブームを動的に展開した際に発生する反力や振動を効率的に抑制できると考えられる。ブームには2本のコンベックステープが組紐で被覆され、コンパクトに巻き付けが可能な組紐被覆 Bi-Convex ブーム (BCON ブーム) を用いている。これまでに、重力補償なしでの展開実験の限界から、長さ 500 mm のスチール製コンベックステープを使った BCON ブームを用いて、小型モデルの展開実験や多粒子近似法による展開挙動のシミュレーションなどを行っている。本報では、軽量化と大型化を意図し、新たに三軸織 CFRP 製コンベックステープを使った長さ 800 mm の BCON ブームを用いる。まず、CFRP 製ブームの曲げ剛性の計測と繰り返し曲げに対する耐性確認のため、3点曲げ試験を行った。次に、吊り下げ式重力補償法を考案して小型モデルの断続展開実験を実施し、重力補償法の効果と断続展開の有効性を明らかにした。

## 2. BCON ブーム

図 1 に BCON ブームの構造を示す。BCON ブームは2本のコンベックステープを突き合わせて組紐で被覆したものである。図 1 では組紐先端を切断して内部を露出している。伸展時は軽量で高い曲げ剛性を持つが、曲げモーメントが加わると断面が平坦に変形して剛性が低下し、2つのテープが互いに長手方向に滑るため無理なく巻き付け収納が可能である。

本研究で用いた CFRP 製 BCON ブームは、固定用金具を除いた自由長が 800mm、高さが約 14mm、断面の曲率半径が 10mm である。CFRP の積層構成は、内側が三軸織、外側が UD 材の二層になっている。組紐と固定用金具を含むブームの全質量は約 16.7g である。

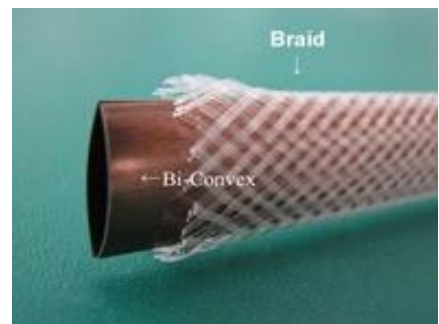


図 1 BCON ブームの構造

### 3. 3点曲げ試験

CFRP 製 BCON ブームの曲げ剛性の計測と繰り返し曲げに対する耐性の確認のため、精密万能試験機を用いて3点曲げ試験を行った。その概要を図2に示す。展開実験時のように固定用金具によってboom片側が拘束されていると、拘束されていない場合よりも曲げ剛性が増加するため、固定用金具が付いた状態で計測を行った。荷重負荷開始から復元までを1サイクルとし、10サイクルの試験を連続して行い、曲げ剛性と曲率の関係を計算した結果を図3に示す。2サイクル目までは特性の変化が見られたが、その後は一定の特性に収束しており、多数回の展開実験に対応できることが確認された。この結果は、数値シミュレーションでのboomの曲げ剛性のモデルに利用される。

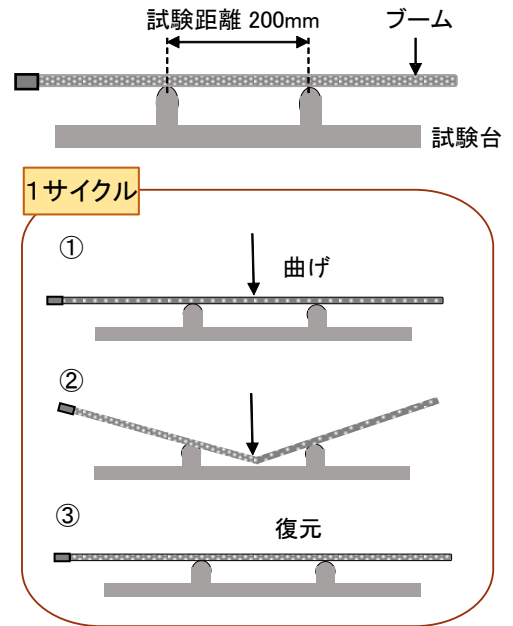


図2 3点曲げ試験

### 4. 展開実験モデル

#### 4.1 展開実験モデル

小型実験モデルの外観を図4に示す。正方形膜面は厚さ15 $\mu\text{m}$ のPET製で、その諸元を表1に示す。膜の折り線は、「らせん折り」<sup>(13)</sup>を直線近似したもので、収納高さ(折り目間隔)は40mmである。各boomと膜面は、長さ20mmのテザーによって、boom根元付近、先端付近および中間の3箇所て結合されている。

4本のboomは、角丸正方形の中心ハブの側面に接線方向に固定されており、7回折り曲げられて収納され、ハブ中心からの半径が異なる4個 $\times$ 3セットのピンで拘束される。そのため1~3段階の展開が可能であり、boomをピンの間にごのように巻き付けるかによって、数通りの断続展開パターンを作ることができる。本研究では、1段階目に  $i$  折り分、2段階目に  $j$  折り分、3段階目に  $k$  折り分を展開する断続展開パターン

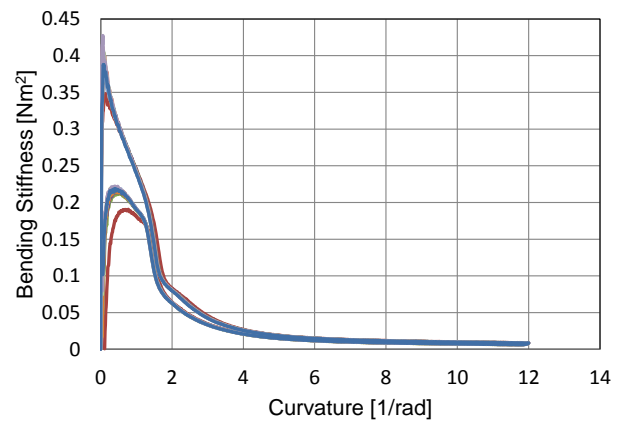
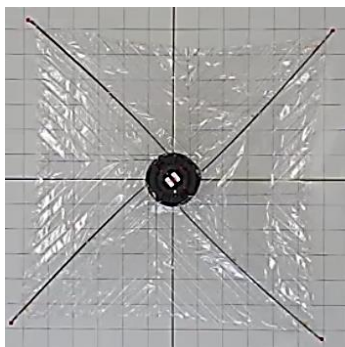


図3 3点曲げ試験結果



(a) 展開状態



(b) 収納状態

図4 展開実験モデル外観

表1 膜の諸元

Density	1420 kg/m <sup>3</sup>
Elastic Modulus	4.0 GPa
Poisson's ratio	0.34
Thickness	15 $\mu\text{m}$

表2 中心ハブの諸元

Length of sides	0.094 m
Mass	2.1 kg
Moment of inertia	0.00468 kg

を*i-j-k*展開と呼ぶことにする。ブーム先端には、画像解析のためのマーカーが取り付けられている。

中心ハブは軸受け付きの台に搭載されており、展開時の反トルクによって中心軸回りに回転可能である。中心ハブの諸元を表2に示す。

#### 4. 2 展開および計測方法

ブームを拘束する4個×3セットのピンは、実験者が赤外線リモートコントローラを操作すると4個同時にバネによって跳ね上げられる。中心ハブの回転軸上に設置したデジタルカメラによって高速度撮影を行い、歪補正を施した後にブーム先端の半径の時刻歴を数値化する。また、中心ハブ上面にワイヤレスジャイロが搭載されており、展開中の中心ハブの角速度をPCに記録する。

### 5. 展開実験

#### 5. 1 重力補償なしの展開実験

まず、これまでと同様に重力補償なしで展開実験を行った。事前に膜面を取り付けずにブームのみで行った実験では、横倒れ座屈することなく正常に展開可能だったが、膜面を取り付けた結果、ブームは静止状態では膜面の重量に耐えられるものの、動的な展開には耐えられない結果となった。拘束を一度に全て解放する一気展開直後の状態を図5に示す。ブームがほぼ展開した時点でブーム根元付近で横倒れ座屈が発生し、展開終了後も折れ曲がったままとなった。ただし、数秒後にはゆっくりと復元することが観察された。これにはBCONブーム内部の摩擦も影響していると考えられる。



図5 一気展開後のブームの座屈（重力補償なし）

#### 5. 2 重力補償法の導入

ブームの横倒れ座屈の対策として、本展開実験に合わせた図6のような吊り下げ式重力補償法を考案した。中心ハブの回転軸上2m程度の高さで動画撮影用カメラの下に吊り点を設け、ブーム先端と吊り点の間を4本の軽量なテザー（テグス）で接続した。吊り点では、回転可能な金具とテザーを接続した。テザー長は、ブームが真直な状態のときにわずかに弛みが残るように調整した。テザーに張力が発生するとブームに半径方向の力が作用するが、展開途中にはテザーは弛んでおり張力はほとんど発生せず、最終段階にブームが真直な状態まで展開した

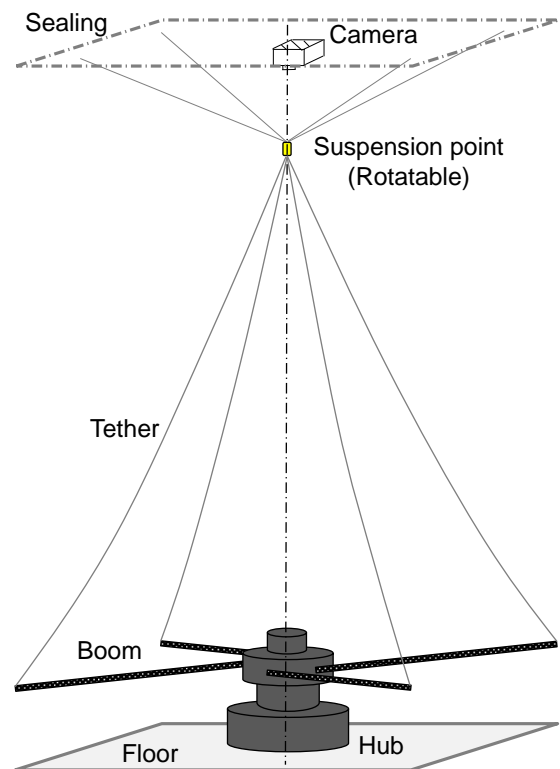


図6 吊り下げ式重力補償

後、オーバーシュートや面外変形したときに、主に上向きの張力が発生する。そのため、展開挙動に与える影響は小さいと考えられる。

### 5. 3 重力補償ありの展開実験結果

重力補償を導入した後、一気に展開実験と数通りの断続展開実験を行った。図7～9に一気に展開、2段階展開（4－3展開）および3段階展開（1－2－4展開）のカメラ映像から切り出した静止画像を示す。いずれの場合にも、横倒れ座屈を生じることなく展開しており、重力補償が概ね有効

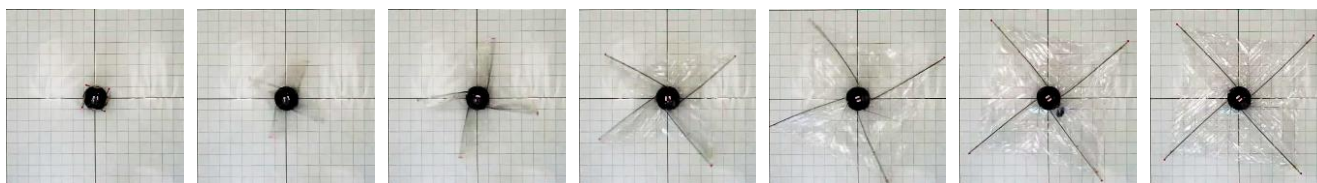


図7 一気に展開

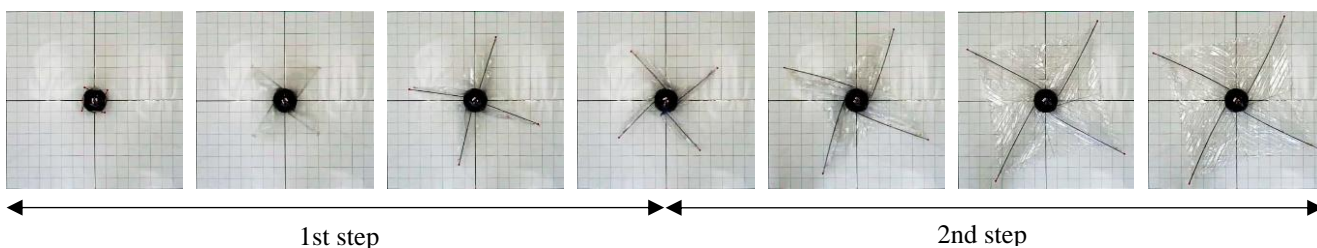


図8 2段階展開（4－3展開）

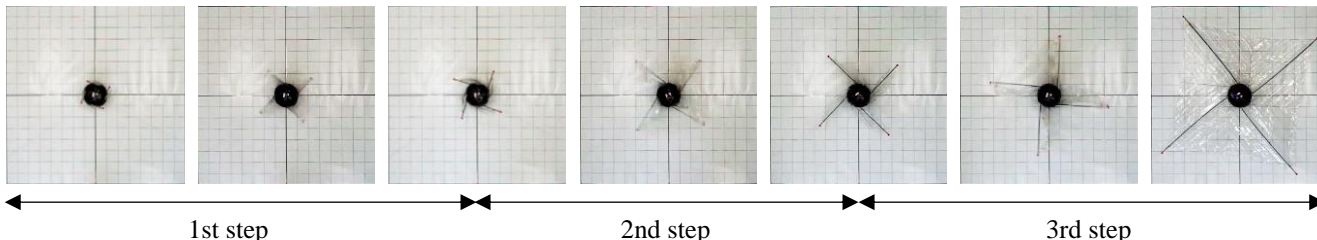


図9 3段階展開（1－2－4展開）

に機能することが確認された。一気に展開では、ブームと膜面の展開は展開開始から1秒以内に完了した。その間、中心ハブは逆回転し、展開後も数秒間回転が継続した。1本のブームの展開に遅れが見られるが、これは収納状態のばらつきの影響と考えられる。断続展開では、最終段の展開完了時に1～2本のブームの根元が折れ曲がりかけ、直ちに復元した場合が見られたが、これは一気に展開よりも最終段の展開速度が低いためと思われる。また、展開完了後のハブの回転も一気に展開よりも少ない。

次に、断続展開の有効性を検証するため、展開中に中心ハブが受けるトルクを評定と考

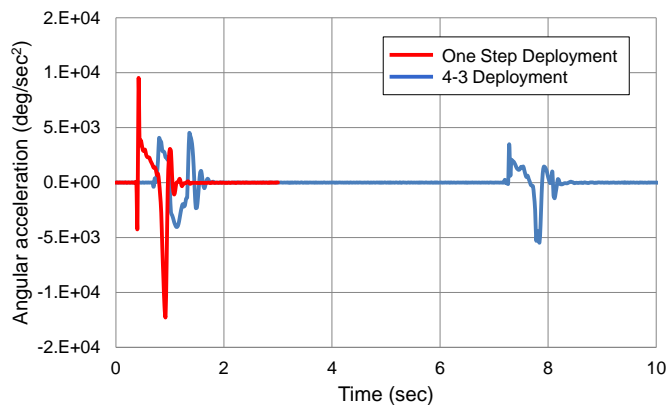


図10 一気に展開と2段階展開（4－3展開）における中心ハブの角加速度の比較

え、各展開実験における中心ハブの角速度計測結果から角加速度を求めた。図 10 に一気展開と 4 – 3 展開の中心ハブの角加速度の比較を示す。4 – 3 展開では、一気展開と比較して角加速度の大きさが半分以下に低減されていることがわかる。他の断続展開パターンにおいても、各段階での展開長さの配分の違いによって程度の差異はあるものの、低減が確認された。重力補償の影響などを確認する必要はあるが、断続展開の有効性が確認できたものと考えられる。

## 6. 結言

ブームと膜面を一体的に巻き付け収納し、ブームの弾性によって断続展開する構造概念の有効性を検討するため、新たに製作した長さ 800 mm の CFRP 製 BCON ブームを用いて、曲げ剛性の計測と断続展開実験を行った。3 点曲げ試験により、ブーム根元の取り付け金具の有無が曲げ剛性に影響すること、CFRP 製 BCON ブームが多数の繰り返し曲げに耐えることを確認した。次に、ブームの横倒れ座屈防止のため吊り下げ式重力補償法を考案し、断続展開実験を行った。その結果、重力補償の効果を確認するとともに、展開時に中心ハブが受けるトルクが断続展開によって低減されることを確認し、断続展開の有効性を明らかにした。

今後、重力補償法が展開挙動に与える影響の確認や、今回の実験に対応した多粒子近似法による展開シミュレーションなどを進めるとともに、実構造物への応用も想定した収納方法や展開機構の改良を行いたい。

## 参考文献

1. G. Vulpetti et al., *Solar Sails: A Novel Approach to Interplanetary Travel (Second Edition)*, Springer, 2015.
2. M. Macdonald (ed.), *Advances in Solar Sailing*, Springer, 2014.
3. W. Wilkie, et al., *Recent Advances in Heliogyro Solar Sail Structural Dynamics, Stability, and Control Research*, AIAA-2015-0431, 2015.
4. A. Viquerat, et al., *Functional and Qualification Testing of the InfateSail Technology Demonstrator*, AIAA-2015-1627, 2015.
5. M. Straubel, *The Design and Test of the GOSSAMER-1 Boom Deployment Mechanisms Engineering Model*, AIAA2015-1837, 2015.
6. H. Sakamoto, et al., *Wrapping Fold and Deployment Characteristics of Boom-Membrane Integrated Space Structures*, AIAA2015-0680, 2015.
7. O.R. Stohlman, et al., *Development of the Deorbisail flight model*, AIAA2014-1509, 2014.
8. D.C. Alhorn, et al., *NanoSail-D: The Small Satellite That Cloud!*, 25<sup>th</sup> Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC11-VI-1, 2011.
9. Mori, et al., *World's First Demonstration of Solar Power Sailing by IKAROS*, in: Vazquez-Poritz, J.F. (Ed.), *Abstracts of the Second International Symposium on Solar Sailing*, 2010, pp. 19–20, 2010.
10. M.C. Natori, et al., *Stepwise Deployment of Membrane Space Structures Rolled-Up Together with Support Booms*, 63rd International Astronautical Congress, IAC-12.C2.2.9, 2012.
11. N. Okuizumi et al., *Numerical Simulation of Stepwise Deployment of Membrane Structure with Booms Using Multi-Particle Approximation Method*, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, Vol. 12, No. ists29, pp. Pc\_93-Pc\_98, 2014.
12. 小林寛明ほか, 組紐被覆ブームによる膜面展開構造物 — 実験とシミュレーション —, 第 56 回構造強度に関する講演会, 1B16, 2014.
13. 渡辺啓隆, 名取通弘, 大型太陽電池セルの折り畳みと展開, 第 48 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2C14, pp.796-800, 2004.