

# A10 三軸織円筒 CFRP ブームの巻き付け状態が展開特性に及ぼす影響の実験検討

横松卓 (東工大・院), 古谷寛 (東工大), 坂本啓 (東工大), 佐藤泰貴 (JAXA), 奥泉信克 (JAXA)

Takashi Yokomatsu (Tokyo Institute of Technology), Hiroshi Furuya (Tokyo Institute of Technology)  
Hiraku Sakamoto (Tokyo Institute of Technology), Yasutaka Satou (JAXA), Nobukatsu Okuizumi (JAXA)

## 1. 序論

大型展開宇宙構造物の中で高収納性・軽量であることから膜面展開構造物の研究がすすめられている。膜面の展開方法の一つであるブーム展開方式は、ブーム軸力により膜面に張力を与え、展開ならびに展張させる方式である。このため、ブーム展開方式は展開後の膜面形状の保持が容易である。その一方で、ブームの座屈強度で展開力が制限され、比較的小型～中型の膜面の展開に用いることが有効であると考えられる。

近年、展開機構の簡略化のため、自己伸展が可能なブームを用いたブーム展開方式が注目されており、自己伸展ブームの一つとして組紐被覆コンベックステープブーム (Braid Coated Bi-Convex tape Boom, BCON ブーム) [1]が提案されてきた。BCON ブームは2枚のコンベックステープをフラットにつぶして巻くことで収納することを実現可能にするものであり、収納過程で蓄積した弾性エネルギーを開放することでアクチュエータを用いない展開が可能である。BCON ブームの力学特性については、宮崎ら[2]により理論解析がなされ、山崎ら[3]により BCON ブームを用いた膜の展開実験ならびに、シミュレーション解析などが進められてきた。

しかし、BCON ブームは開断面のブームであり、横倒れ座屈荷重が低い。これを改良した自己伸展ブームとして、三軸織円筒 CFRP ブームを用いた膜面展開構造の研究が行われてきた[4]。著者らは展開力に優れた強化型三軸織円筒 CFRP ブームを用いた 20m<sup>2</sup>サイズのデオビット膜構造の実現を目標として、ブーム・膜巻きつけ折り畳み構造物のスケールモデルによる地上展開実験を行った[5]。この結果、展開挙動はモデルのスケールを大きくすると、膜やホバークラフト式重力補償装置による抵抗の影響から、ブームの先端から順次展開するのではなく巻き付けハブの内部から巻き付けが解ける現象や、膜面の展開が非対称展開となるなど、複雑な展開を示した。更に、膜面の完全な展開のためには、ブームや膜や重力補償装置の詳細な展開特性を考慮した設計が必要であることが明らかになった。

本研究は、強化型三軸織円筒 CFRP ブームの展開特性に注目し、ブームの巻き付け本数の変化による巻き付け状態の変化が展開特性に与える影響と、ホバークラフト式重力補償装置が展開特性に与える影響を実験的に明らかにすることを目的とする。

## 2. 展開モデル

### 2-1 ブーム・膜巻きつけ折り畳み構造物のスケールモデル

まず、著者らが行ってきた実験[5]について概説する。強化型三軸織円筒 CFRP ブームを使った膜面の展開実験スケールモデルにおける膜は、折り畳み方に Skew fold[6] /Spiral fold[7]をベースとした Fig.1 に示すパターンを用いた[8]。この折り方を用いることにより、三軸織円筒 CFRP ブームをつぶし、膜を折り畳みながら巻きつけることで、Fig.2 のように一体に折り畳むことができる。実験に用いたスケールモデルは、膜を PET 製の厚さ 25mm、一辺の長さ 1.4m、折り巾 70mm の正方形膜とし、強化型三軸織円筒 CFRP ブームを長さ 1m、直径 40mm とし、巻きつけ折り畳みを行った。巻きつ

けた膜の保持機構を開放し、自己展開させると、Fig.3 のように展開できることが示された。展開実験より、提案するブーム・膜巻きつけ折り畳み構造は、ブームと膜の一体収納・保持ならびに自己展開可能であること、ホバークラフト式重力補償の有効性を示してきた。しかし、展開が完全にできない場合も起こることが認められ、膜の確実な展開を実現するためにはブームと膜の展開力学特性を詳細に把握することが必要であることが明らかになった。

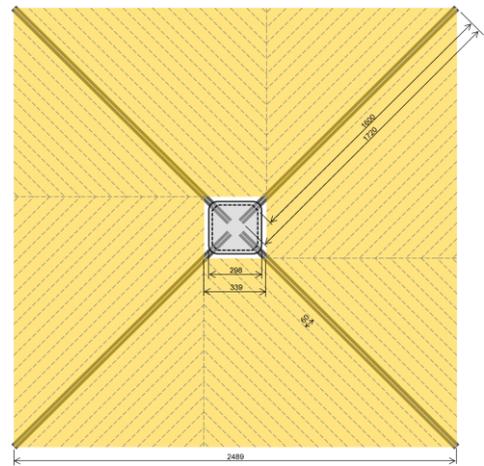


Fig.1 折り畳みパターン



Fig.2 収納状態



Fig.3 展開状態

## 2-2 強化型三軸織円筒 CFRP ブーム

本研究では、強化型三軸織円筒 CFRP ブーム単体の力学特性に焦点を当て、その展開途中の変形過程の力学特性を明らかにするため、Fig.4 に示す長さ 1m、直径 13mm の強化型三軸織円筒 CFRP ブームを用いて展開実験を行った。三軸織円筒 CFRP ブームは、三軸織 CFRP からなる半円筒のブーム二本を樹脂結合したものである。樹脂部分を潰してフラットにし、曲げることで巻きつけによる収納が可能となる。この三軸織円筒 CFRP ブームに一軸繊維補強を施すことで、展開力を増大させたものが強化型三軸織円筒 CFRP ブームである。



(a) 断面形状



(b) 全体形状

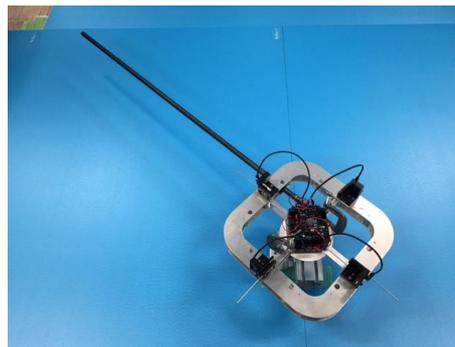


(c) 変形状態

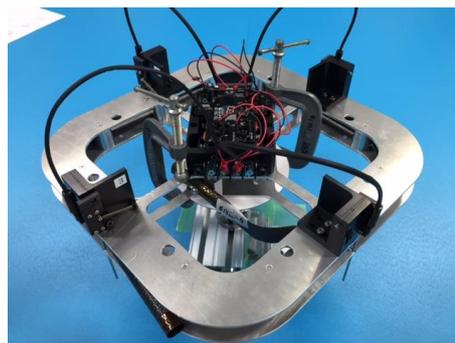
Fig.4 強化型三軸織円筒 CFRP ブーム(径 13mm)

## 2-3 実験モデルの構成

実験で用いた強化型三軸織円筒 CFRP ブームを一本取り付けたモデルの展開状態と巻き付け状態を Fig.5 に示す。ブームは Fig.6 に示すように、巻きつけハブに片持ち梁状に固定した。本研究では巻きつけハブは回転固定としている。



(a) 展開状態



(b) 巻き付け状態  
Fig.5 実験モデル

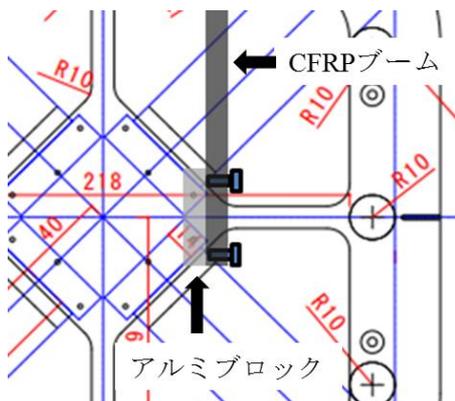


Fig.6 ブーム固定方法

## 3. 展開実験

### 3-1 実験概要

初めに、巻きつけハブに強化型三軸織円筒 CFRP ブーム一本の展開実験を行い、次に同一形状の他のブーム試験体を用いて展開実験を行うことで試験体の相違による展開特性の差異を確認した。

次に、二本の強化型三軸織円筒 CFRP ブームを巻きつけハブに対角上に取り付けた場合と、四本の強化型三軸織円筒 CFRP ブームを巻きつけハブに取り付けた場合の展開実験を行い、巻き付け本数の相違による展開特性の差異を確認した。

次に、三軸織円筒 CFRP ブームの先端に重力補償装置を取り付け、三軸織円筒 CFRP ブームを一本のみ巻きつけた場合と、二本巻きつけた場合と、四本巻きつけた場合の展開実験を行い、重力補償装置の有無による展開特性の差異を確認した。

Fig.7 のように巻きつけハブ中心を原点とし、展開後の三軸織円筒 CFRP ブームに対して水平方向を y 軸、直交方向を x 軸とした座標系でブーム先端位置の時刻履歴を高速カメラ

ラ (CASIO 製 EX-ZR1300) による高速度撮影により取得した。カメラを Fig.8 のように巻き付けハブ上の直上に設置し、展開過程を 240fps のコマ数で撮影し、一フレームずつ 512×384 ピクセルの画像に変換した。基準長の長さと同画像内のピクセル数の比を取り、ピクセル間の長さを現実の長さに対応させ、ブーム先端位置履歴を読み取った。ピクセルあたりの長さは 5.4mm となった。

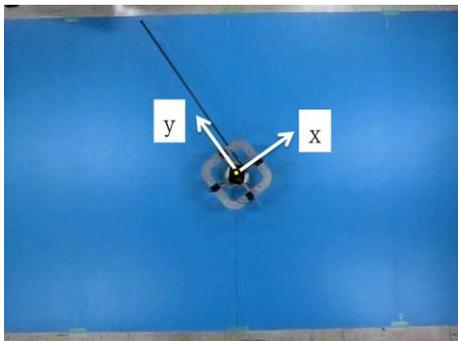


Fig.7 座標系

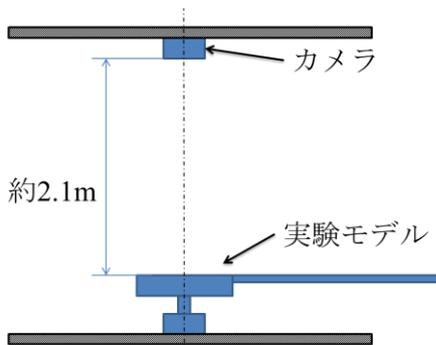


Fig.8 計測装置配置概形

### 3-2 強化型三軸円筒 CFRP ブームの先端軌跡

強化型三軸織円筒 CFRP ブームの展開過程の先端位置の軌跡を Fig.9-12 に示した。ブームの個体による違い、巻き付け本数の違いによる軌跡の相違、重力補償の有無の影響を確認するため、計測したそれぞれの軌跡を比較した。

Fig.9 は二本の同サイズの三軸織円筒 CFRP ブームを boom1 と boom2 とし、それぞれを一本展開させた時の先端位置の軌跡を示している。Table 1 は boom1 と boom2 の軌跡の差の最大値と平均値を示している。軌跡の最大の差は 25.81mm、平均の差は 10.11mm であった。Fig.9 より、ブームの軌跡はほぼ一致しており、一本展開時における強化型三軸円筒 CFRP ブームの先端軌跡は、ブームの個体が異なる場合においても、本モデルではほぼ同一の展開軌跡を示すことが確認された。

Fig.10 は同一ブームの一本巻き付け展開時と二本巻き付け展開時と四本巻き付け展開時の軌跡を示している。Table 2 は一本展開時の軌跡に対する二本展開時と四本展開時の軌跡の差を示している。Fig.9 より、ブームの軌跡はほぼ一致していることが確認でき、Table 2 より、巻き付け本数を変化させた場合の軌跡の差は、Table 1 に示したブームの個体差等による差の値と同程度であることが確認できる。よって、本モデルでブームのみの展開を行う場合、ブームの巻き付け本数の変化がブーム先端位置の軌跡に与える影響は少ないことが明らかになった。

Fig.11 はそれぞれの巻き付け本数において、重力補償の有りと無しの場合の軌跡を比較している。Table 3 はそれぞれの巻き付け本数における重力補償の有りと無しの場合の軌跡の差を示している。(a)の一本展開時について、重力補償の有無で軌跡に差はほぼ見られず、Table 3 より最大値、平均値共に Table 1 に示したブームの個体差等による差の値より小さいことが確認できた。(b)の二本展開時について、Table 3 より最大値、平均値共に Table 1 に示したブームの個体差等による差の値と同程度であることが確認できた。(c)の四本展開時においても、一本展開時と同様に重力補償の有無で軌跡に差はほぼ見られず、Table 3 より最大値、平均値共に Table 1 に示したブームの個体差等による差の値より小さいことが確認できた。以上より、本モデルでは、重力補償装置の有無がブームの先端位置の軌跡に与える影響は少ないことが明らかになった。

Fig.12 はブームの先端に重力補償装置を取り付けた場合のブーム一本展開時と二本展開時と四本展開時における同一ブームの軌跡を示している。Table 4 は一本展開時に対する二本展開時と四本展開時の軌跡の差を示している。Fig.12 より三本の軌跡はよく一致しており、Table 4 より、巻き付け本数を変化させた場合の軌跡の差は、Table 1 に示したブームの個体差等による差の値と同程度であった。このことより、重力補償装置を取り付けた場合においても、本モデルではブームの巻き付け本数の変化がブーム先端位置の軌跡に与える影響は少ないことが明らかになった。

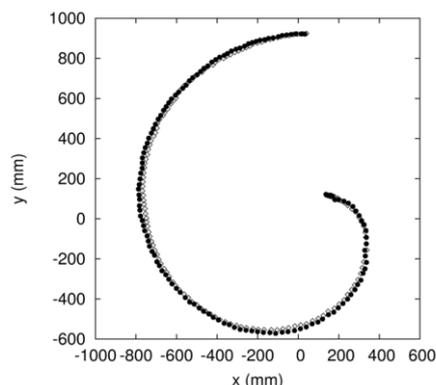


Fig.9 一本展開時のブーム先端軌跡

Table 1 boom1 と boom2 の軌跡の差の最大値と平均値

| max     | average |
|---------|---------|
| 25.81mm | 10.11mm |

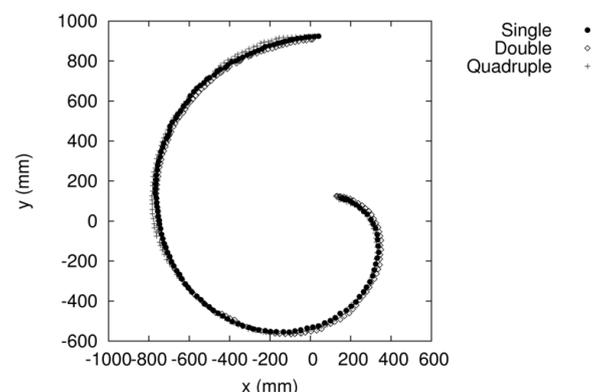
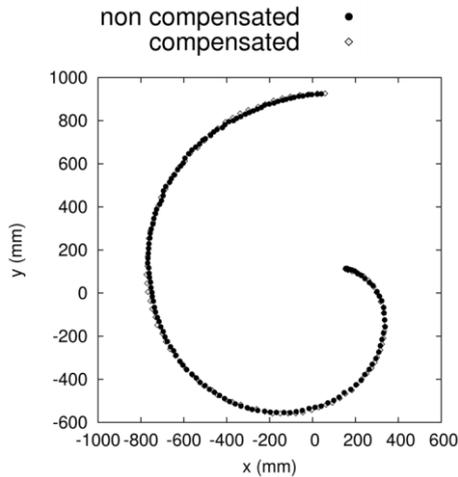


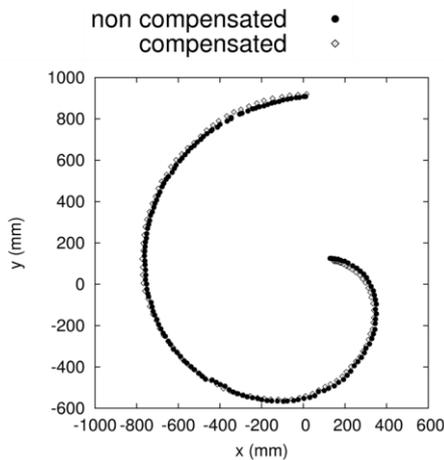
Fig.10 各巻き付け本数のブーム先端軌跡

Table 2 一本展開時に対する二本展開時と四本展開時の軌跡の差の最大値と平均値

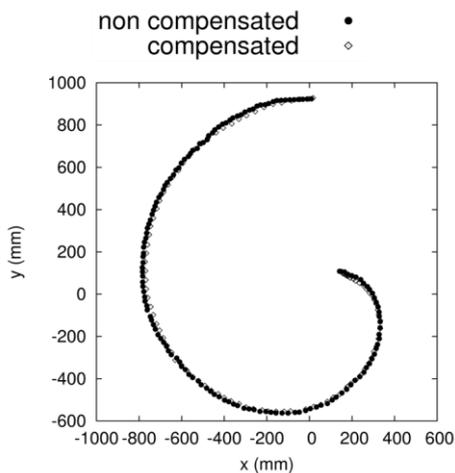
|           | max     | average |
|-----------|---------|---------|
| Double    | 23.20mm | 10.47mm |
| Quadruple | 28.50mm | 10.13mm |



(a) 一本展開時



(b) 二本展開時



(c) 四本展開時

Fig.11 重力補償の有無による軌跡の比較

Table 3 各巻き付け本数における重力補償の有無による軌跡の差の最大値と平均値

|           | max     | average |
|-----------|---------|---------|
| Single    | 17.78mm | 4.86mm  |
| Double    | 24.39mm | 11.29mm |
| Quadruple | 19.50mm | 7.55mm  |

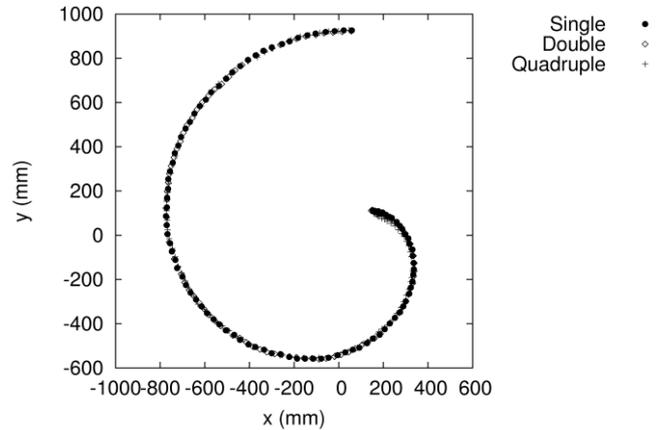


Fig.12 重力補償の取り付け時の各巻き付け本数のブーム先端軌跡

Table 4 一本展開時に対する二本展開時と四本展開時の軌跡の差の最大値と平均値 (重力補償装置あり)

|           | max     | average |
|-----------|---------|---------|
| Double    | 7.00mm  | 2.40mm  |
| Quadruple | 10.12mm | 3.32mm  |

### 3-3 強化型三軸円筒 CFRP ブームの展開角時刻履歴

強化型三軸織円筒 CFRP ブームの原点周りの展開角変化の時刻履歴を調べ Fig.13-15 に示した. 図の横軸は展開時刻[s], 縦軸は展開角[rad]を示している.

Fig.13 はブーム一本展開時と二本展開時と四本展開時における同一ブームの展開角時刻履歴を比較したものである. Table 5 に複数回の展開実験より得られた各巻き付け本数時の展開に要する時間の範囲を示す. 実験結果より, 展開に要する時間と巻き付け本数の間に明確な傾向が確認できなかった. また, 展開開始から約 0.07s の範囲において巻き付け本数が多い展開のほうが展開が進んでいることが明らかになった. これは展開初期においては, 巻き付け本数が多いほど展開力が強いということを示している. 複数本巻き付け時に発生するブーム同士の重なりによるブーム巻き付け曲率半径の増加が影響していると考えられるが, 宮崎[2]や Iqbal ら[9]によって示されたコンベックステープのような構造は巻き付け曲率半径が小さいほうが, テープの単位長さあたりに蓄えられるエネルギーは多く展開力が大きいという結果に反する. この理由としては, 巻き付け本数を増やすとブームが重なり, 曲率半径が大きくなる一方で, ブームの曲がっている部分が長くなるため, 蓄えられる弾性エネルギーの和は巻き付け本数が少ないものより大きくなるためであると考えられる. また, 下に重なったブームがフラットな状態から円筒に戻ろうとし, 上に重なったブームを押し出すことで展開力が強まっているということも考えられる.

Fig.14 は重力補償装置を取り付けた場合のブーム一本展開と二本展開と四本展開の展開角時刻履歴を比較したものである. Table 6 に複数回の展開実験より得られた各巻き付け本数時の展開に要する時間の範囲を示す. 展開に要する時間は

重力補償無しの場合の約5倍となった。重力補償装置が無い場合と同様に、展開に要する時間と巻き付け本数の間に明確な傾向が確認できず、展開開始から約0.1sの範囲において、巻き付け本数が多い展開のほうが展開が進んでいることが明らかになった。

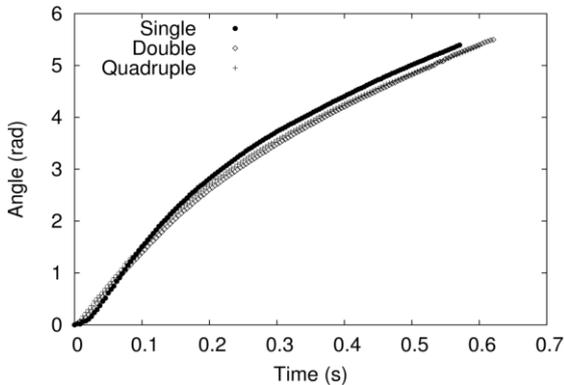


Fig.13 一本展開時のブーム先端軌跡

Table 5 各巻き付け本数の展開時間の範囲

|           | 展開時間[s]     |
|-----------|-------------|
| Single    | 0.546~0.571 |
| Double    | 0.547~0.621 |
| Quadruple | 0.538~0.617 |

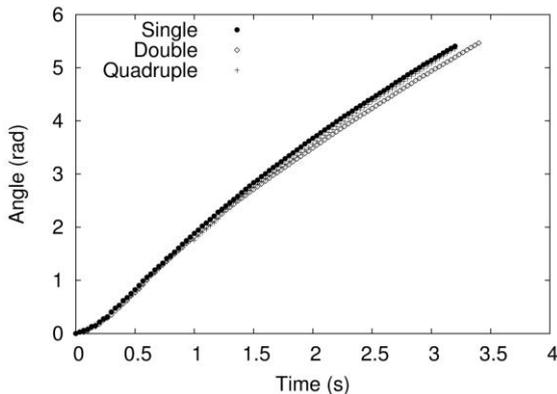


Fig.14 一本展開時のブーム先端軌跡

Table 6 各巻き付け本数の展開時間の範囲

|           | 展開時間[s]     |
|-----------|-------------|
| Single    | 3.203~3.38  |
| Double    | 3.135~3.455 |
| Quadruple | 3.262~3.424 |

#### 4. 結言

三軸織円筒 CFRP ブームの展開力学特性として、展開過程のブーム先端位置の軌跡と展開角時刻履歴を実験的に取得し、中心構体である巻き付けハブが回転固定である場合のブームの巻き付け本数の違いと、重力補償装置の有無が展開力学特性に与える影響を明らかにした。その結果、本モデルにおいて、ブーム巻き付け本数が変化した場合、ブームの先端位置の軌跡に与える影響は少ないが、巻き付け本数が多いほど展開初期の展開力が増加していることが明らかになった。また、重力補償を取り付けた場合も同様に、ブームの先端位置の軌跡に与える影響は少ないことが明らかになった。

#### 参考文献

- [1] 渡邊秋人ほか，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，pp.1-6，2012.
- [2] 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講演集，1A18，静岡，pp.48-50，2014.
- [3] 山崎雅宣ほか，組紐被覆ブームからなる膜面宇宙構造物の展開実験，3A03，北海道，pp.204-206，2013.
- [4] 古谷寛ほか，円筒 CFRP ブームを用いた巻き付け型展開膜構造の検討，第 29 回宇宙構造・材料シンポジウム，相模原，2013.
- [5] 古谷寛ほか，ブーム・膜巻き付け折り畳み構造の地上展開実験，第 56 回構造強度に関する講演会講演集，1A18，静岡，pp.126-128，2014.
- [6] Hiroshi Furuya, et al. "Concept of Rotationally Skew Fold Membrane for Spinning Solar Sail," CD-ROM Proc. 55th International Astronautical Congress, IAC-04-I.1.05, Vancouver, pp.1-5, Oct. 2004.
- [7] M.C.Natori, et al. "Folding Patterns of Deployable Membrane Space Structures Considering Their Thickness Effects," 18th Int.Conf. on Adaptive Structures and Technologies, Ottawa, pp.1-9, Oct. 2007.
- [8] H. Sakamoto, H. Furuya, Y. Satou, M. C. Natori, A. Watanabe, N. Kawabata, R. Sakai, N. Okuizumi, O. Mori, Y. Shirasawa, M. Takai, N. Katsumata, A. Torisaka, R. Funase, "Origami-based Membrane Storage and Deployment Technology for De-orbiting Satellites," No. IAC-13.B4.6A.4, presented at 64th International Aeronautical Congress, Beijing, China, pp.1-9, Sept. 2013.
- [9] K.Iqbal, S.Pellegrino, "BI-STABLE COMPOSITE SHELLS," Proc. 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Atlanta, pp.3-6, April. 2000,