ブーム・膜巻きつけ折り畳み宇宙構造物のための強化型三軸織円筒 CFRP ブーム の展開実験

Deployment Experiments on Stiffened Tri-axial Tubular CFRP Boom for Boom-Membrane Integrated Space Structures

横松 卓 (東工大院)

Takashi Yokomatsu, Tokyo Institute of Technology

古谷 寛 (東工大)

佐藤泰貴 (JAXA)

坂本 啓 (東工大)

Hiroshi Furuya, Tokyo Institute of Technology

Yasutaka Satou, JAXA

Hiraku Sakamoto, Tokyo Institute of Technology

Key Words: *Deployable structures, Boom, Mast, Space structures, experiment*

論文要旨

ブーム・膜巻きつけ折り畳み宇宙構造物において、強化型三軸円筒 CFRP ブームの詳細な展開力学特性を実験的に明らかにすることを目的とし、ブーム単体での展開実験を行った。展開過程からブーム先端位置の軌跡を描き、原点周りの展開角変化の時刻履歴を調べた。また、同一形状の他のブームを取り付けた場合と、ブームを一本巻きつけた場合と二本巻きつけた場合の比較を行った。ブームの先端位置の軌跡から、実験モデルではほぼ同一の軌跡となるが、二本巻き付けて展開させた場合、若干の差異が生じることが明らかになった。展開角変化の時刻履歴より、同一形状のブームで展開力の差による展開時間の差異が見られた。また、ブームを二本巻きつけた場合の方が展開が遅れると共に、展開初期において展開が早く進むことが明らかになった。

1. はじめに

宇宙科学ミッションの高度化により、大型展開宇宙構造物が求められており、その中でも高収納性・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。膜面の展開方法にはブーム展開方式とスピン展開方式が検討されている。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ため、ブームの座屈強度で展開力が制限される。このため、比較的小型～中型の膜面の展開に用いることができるのに対し、大型の膜面展開構造物については遠心力によって張力を与えるスピン展開方式が適している。

近年、自己展開ブームを用いた展開方法として、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展開機構を使わずに自己展開することが可能である。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。BCON ブームは 2 枚のコンベックステープが結合されていないため、横倒れ座屈に弱く、これを改良した三軸織円筒 CFRP ブームの研究が行われてきた。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 20m²サイズのデオー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てきた[4]。この結果、確実に膜面が展開する実証機の設計のためには、強化型三軸織円筒 CFRP ブームと膜面の詳細な展開力学特性の把握が必要であることが明らかになった。

以上より、本研究は、強化型三軸織円筒 CFRP ブームの詳細な展開力学特性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[4]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[5]/Spiral fold[6]をベースとした Fig.1 に示すパターンを用いた[7]。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 25 μ m、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 として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、曲げることで巻き付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、巻き付けハブに片持ち梁状に固定した。

(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

強化型三軸織円筒 CFRP ブーム単体の展開実験は以下のように実施した。

初めに、巻き付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、その後、同一形状の他のブーム試験体を用いて展開実験を行い、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 ブームを巻き付けハブに対角上に取り付け、巻き付けた状態から同時に展開実験を行った。

それぞれの三軸織円筒 CFRP ブームを Fig.7 に示すように boom1, boom2 とし、座標系を巻き付けハブ中心を原点とする x-y 座標でブーム先端位置の時刻履歴をカメラによる高速撮影により取得した。カメラは Fig.8 の実験ハブ上に鉛直に設置し、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。基準長の長さと画像内で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。ピクセル間の物理長さは 5.4mm となった。

Fig.7 boom1 と boom2 の配置と座標系

Fig.8 計測装置配置概形

3-2 展開過程

三軸織円筒 CFRP ブームを二本取り付けた時の展開過程を Fig.9 に示す. boom2 の保持開放機構の開放タイミングは boom1 よりも 0.038s 遅れているため, 非同期な展開となっている.

Fig.9 強化型三軸織円筒 CFRP ブームの展開過程

3-3 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.10-12 に示した. それぞれのブームについて, 保持している保持開放機構のピンが上がった時刻から軌跡を描くことにより, 開放時間の遅れを補正した. ブーム個体の違い, 及び一本展開と二本展開の違いによる軌跡の相違を確認するため, 計測したそれぞれの軌跡を比較した. 対角線上に巻き付けハブに固定された boom1 と boom2 の結果を比較するため, boom1 のプロットは元のプロットを原点周りに 180° 回転させた.

Fig.10 はブーム一本展開時の boom1 と boom2 の軌跡を示している. Fig.10 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, ブーム個体差, 及び取り付け位置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.11 はブーム二本展開時の boom1 と boom2 の軌跡を示している. この図より, 二本展開時では boom1 と boom2 で一本展開時よりも軌跡の差異が大きくなることが示された. このことより, 二本展開時のブームの巻き付けの際に生じるブームの重なりが影響することが考えられる.

Fig.12 は boom1 と boom2 のそれぞれについて, ブーム一本展開時と二本展開時の軌跡の比較をしている. (a)の boom1 については一本展開時と二本展開時で軌跡はほぼ同一であるが, boom2 については, boom1 の時よりの差異が大きくなった. Fig.11 の結果と合わせて考えると, 二本展開時のブームの巻き付けの際に生じるブームの重なりの影響は boom1 より boom2 のほうが大きいと考えられる.

Fig.10 一本展開時のブーム先端軌跡

Fig.11 二本展開時のブーム先端軌跡

(a) boom1

(b) boom2

Fig.12 一本展開時と二本展開時のブームの先端軌跡

3-4 強化型三軸円筒 CFRP ブームの展開角時刻履歴

強化型三軸繊維円筒 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の boom1 と boom2 の展開角時刻履歴を示している。展開開始から 0.2s 程度まではほぼ同一の展開角となっており、それ以降については boom2 の展開が遅れている。これは、boom2 の展開力が boom1 の展開力よりも若干小さいためと考えられる。

Fig.14 はブーム二本展開時の boom1 と boom2 の展開角時刻履歴を示している。この図より、boom1 と boom2 の展開角時刻履歴の差異が一本展開時よりも大きくなっていることが示されており、展開に要する時間の差も大きくなっていることが示されている。この結果より、二本展開時のブームの巻き付けの際に生じるブームの重なりが展開履歴に影響してくることが明らかになった。

Fig.15 は boom1 と boom2 のそれぞれについて、ブーム一本展開時と二本展開時の展開角時刻履歴を比較したものである。これらの結果から、展開に要する時間が一本展開時より二本展開時のほうが長くなっている。これは、二本展開時のブームの曲率が巻き付けの際に生じるブームの重なりの影響で一本展開時の場合より小さくなり、蓄えられる弾性エネルギーが小さくなっているためであると考えられる。しかし、詳細に検討すると、どちらのブームも展開開始から 0.07s 程度までは二本展開時のほうが展開が早く行われていることが示されており、展開直後においては一本展開時のブームより二本展開時のブームのほうが展開力が強いことが示されている。また、展開に要する時間の増加は boom2 のほうが顕著なり、このことから、ブームを二本巻き付けることの影響を boom1 よりも boom2 の方が大きく受けていると考えられる。

Fig.13 一本展開時のブーム展開角時刻履歴

Fig.14 二本展開時のブーム展開角時刻履歴

(a) boom1

(b) boom2

Fig.15 一本展開時と二本展開時のブーム展開角時刻履歴

4. 結言

三軸織円筒 CFRP ブームの詳細な展開力学特性を展開実験を通して明らかにした。その結果、ブーム先端の軌跡については一本展開時と二本展開時に顕著な違いは認められないことが示され、また、異なる三軸織円筒 CFRP ブームについても、単体ではほぼ同一の展開軌跡となった。しかし、二本同時展開の場合には、若干軌跡の差異が生じることが認められた。

展開角時刻履歴によってブームの展開角度変化を検討した結果、ブーム展開時間の差異が認められ、展開力の差異が影響していることが示された。また、二本同時展開を行った結果より、二本同時展開では巻きつけ時の重なりの影響により、展開時間がかかること、ならびに、展開の初期段階において、一本展開時より早く展開していることから、展開初期の展開力が僅かながら大きいことが示された。

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、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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 Astronautical Congress, Beijing, China, pp.1-9, Sept. 2013.