

A04 三軸織 CFRP 展開ブームを巻きつけるハブの慣性モーメントが展開特性に及ぼす影響

横松 卓 (東工大・院), 古谷 寛 (東工大)

Takashi Yokomatsu (Tokyo Institute of Technology), Hiroshi Furuya (Tokyo Institute of Technology)

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ができ、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[3]。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た[4]。この結果、展開挙動はモデルのスケールを大きくすると、ブームの先端から順次展開するのではなく中心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、複雑な展開挙動を示すことが明らかになった。これにより、軌道上の正確な展開挙動を予測するためには、ブームや膜の展開特性を明らかにする必要があることが明らかになっている。

本研究は、強化型三軸織円筒 CFRP ブームの展開が巻き付け中心ハブに与えるトルクの時刻履歴を実験的に明らかにするとともに、巻き付け中心ハブの慣性モーメントを変化させた時の展開挙動の変化を実験的に明らかにすることを目的とする。

2. ブーム・膜巻きつけ折り畳み構造物

強化型三軸織円筒 CFRP ブームを使ったブーム・膜巻きつけ折り畳み構造物の膜は折り畳み方に 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られる[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。過去に行われた実験[4]に用いられ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。そこで本研究ではブームの展開力学特性として、一本のブームが展開する過程でブームの反トルクがハブの運動に与える影響に注目した。

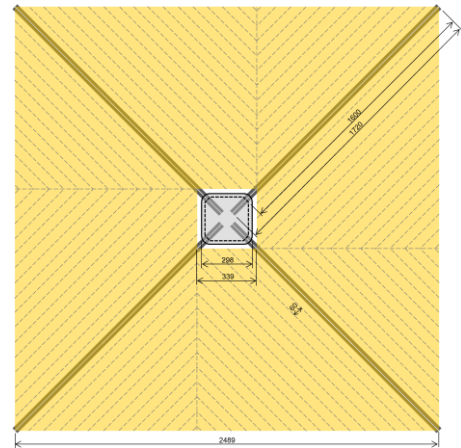


Fig.1 折り畳みパターン[7]



Fig.2 収納状態[7]



Fig.3 展開状態[7]

3. ブーム展開特性の実験的考察

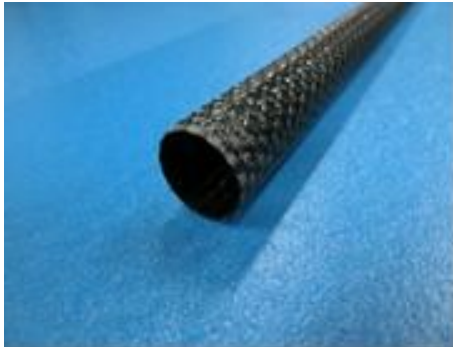
3-1 実験目的

強化型三軸織円筒 CFRP ブームを一本展開させた時にブームがハブの運動に及ぼす影響として、ハブの中心周りのトルク時刻履歴を明らかにする。次に、加速度センサを用いてハブに慣性モーメントを変化させた角速度履歴を計測し、ハブ

の慣性モーメントの変化によるハブの運動への影響を考察する。

3-2 実験モデル

本研究の実験は Fig.4 に示す長さ 1m, 直径 13mm, 質量 20g の強化型三軸織円筒 CFRP ブームを用いた。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。



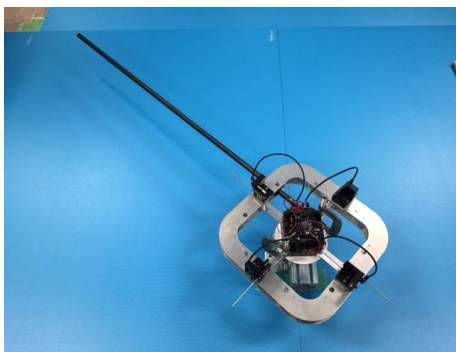
(a) 断面形状



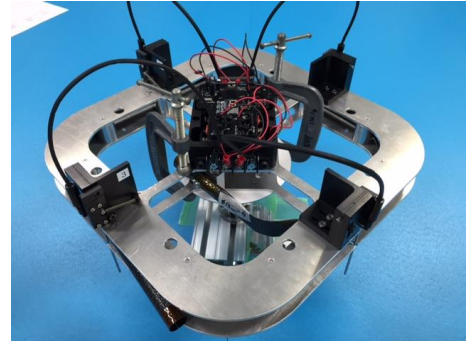
(b) 変形状態

Fig.4 強化型織円筒 CFRP ブーム

本研究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。また、展開モデルの概念図を Fig.6 に示す。中心ハブの辺の長さは 298mm で質量は 1120g である。中心ハブへのブームの取り付けは、ブームの端部が円形断面を保つようにブームをアルミブロックにネジ止めし、アルミブロックを中心ハブに固定した。ブームは支柱に沿って図中の矢印方向に巻きつけ、収納される。



(a) 展開状態



(b) 巻き付け状態

Fig.5 実験モデル

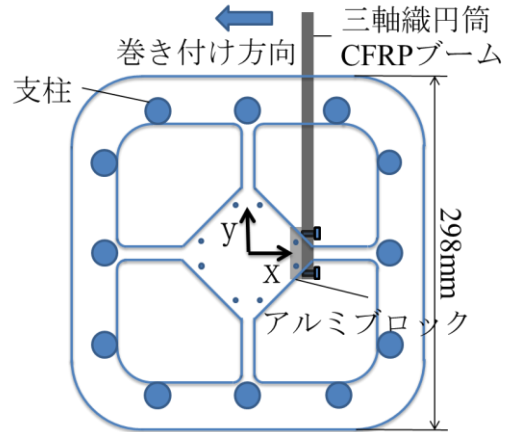


Fig.6 展開モデルの概念図

Fig.7 に示す力覚センサ (Leprino 6 軸力覚センサ SFS080YA101A6) を用いてハブに作用するトルクを計測する。トルク履歴を計測する場合は Fig.8 に示すように中心ハブの下部に力覚センサを固定し、ハブが回転しないよう台の軸を固定した。



Fig.7 力覚センサ

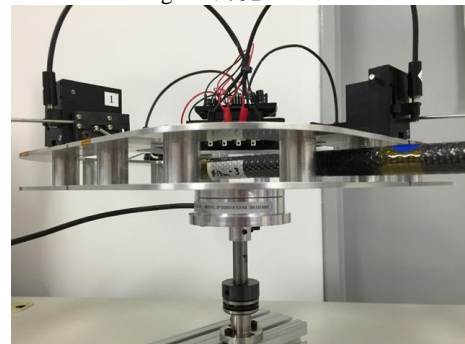


Fig.8 力覚センサの取り付け

ハブの角速度時刻履歴はハブが回転するよう台の軸固定を開放し、Fig.9 に示すようにハブ中心に取り付けられた加速度センサ(ATR-Promotions 小型無線多機能センサ TSND121)を用いて計測した。

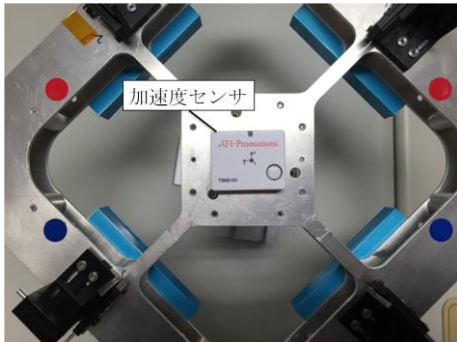


Fig.9 加速度センサの取り付け

ハブの慣性モーメントを増加させるために1つあたり質量約 128g の重りを用いた。重りは Fig.10 に示すようにハブの中心に対して対称になるよう2個ずつ取り付け、最大8個取り付けた。ハブの回転が自由な実験は重りを取り付けない実験を含めて計5種類行われた。

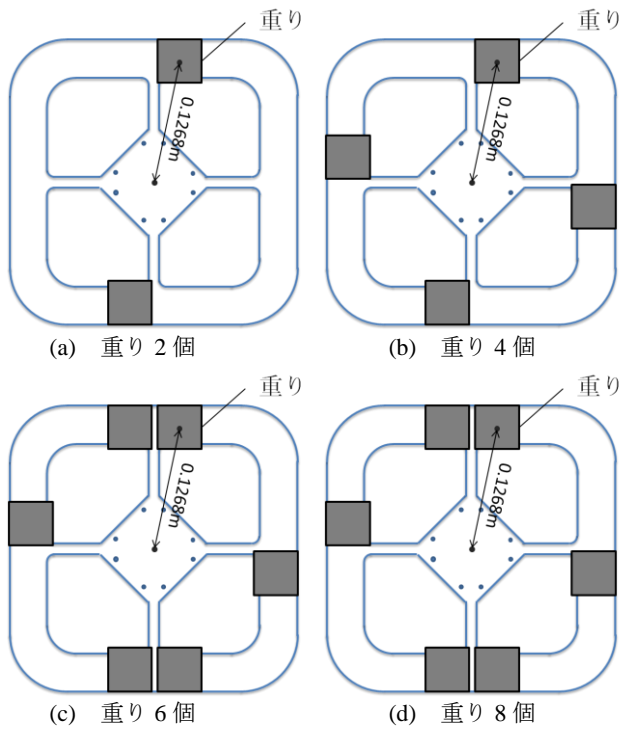


Fig.10 慣性モーメント増加重りの取り付け

3-3 実験手順

力覚センサ取り付け、ハブが回転しないよう軸を拘束し、ブーム展開させz軸周りのトルク時刻履歴を計測した。センサのサンプリング周波数は 1.2kHz、トルクの分解能は 0.00025Nm とした。

次に、Fig.6 に示す加速度センサを取り付け、軸の回転拘束を自由にし、ブームを展開させハブの角速度時刻履歴を計測した。センサのサンプリング周波数は 1.0kHz、角速度分解能は 0.015deg/s とした。ハブの回転が自由な展開実験は Table1 に示すように計5種類の実験が行われた。Table 1 の実験1の慣性モーメントは自由回転するモデルの角速度時刻履

歴を最小二乗法でフィッティングして求めた実験値である。また、質量が付与された実験2から5の慣性モーメントは重りの質量と中心からの距離から慣性モーメントの増分を計算し実験1の値に加えたものである。

Table 1 モデルの実験条件と慣性モーメント

	重りの数	慣性モーメント ブーム収納状態 [kgm ²]	慣性モーメント ブーム展開状態 [kgm ²]
実験 1	0	0.0137	0.0182
実験 2	2	0.0179	0.0162
実験 3	4	0.0222	0.0205
実験 4	6	0.0264	0.0247
実験 5	8	0.0306	0.0289

4. ブームの展開が中心ハブに及ぼす影響

4-1 ハブに作用するトルクの時刻履歴

強化型三軸織円筒 CFRP ブームの展開がハブに及ぼす反トルクの履歴を Fig.11 に示す。ブームは Fig.6 における時計回りで展開し、ハブにはブームの展開方向とは逆方向のトルクが作用する。Fig.6 の鉛直紙面方向が z 軸であり、z 軸に対して右周りを正のトルクとした。ブームの展開が終了するとブームがオーバーシュートし、ハブに負のトルクが作用する。オーバーシュートによるトルクがかかり始めた瞬間を展開終了時刻とすると、ハブの回転を拘束した場合のブームの展開に要する時間は 0.615s である。

図よりブームの展開過程においてブームの反トルクとは逆方向のトルクが発生している。このトルク履歴はブームの振動成分とハブの振動成分が含まれていると考えられる。そこで、展開過程のトルク履歴を高速フーリエ変換すると 25Hz から 40Hz の振動成分が含まれていることが明らかになり、展開が進むほど周波数が低下することが確認された。また別途、ハブ単体で振動特性を計測した結果、ハブの固有振動数が約 30Hz であることが明らかになった。

以上の結果をふまえて、Fig.12 は Fig.11 のトルク時刻履歴からブーム展開がハブに及ぼすトルクを抽出するため、トルクの時刻履歴を 10Hz から 50Hz の範囲をカットする 4 次のバターワースフィルタをかけた結果である。Fig.12 より、ブームがハブに及ぼすトルクは一定ではないことが示された。トルクの増減はブームが断続的に展開しており、ブームを巻きつけている支柱周りのフラットな状態のブーム断面が円筒に戻る際に展開トルクが発生するため生じると考えられる。

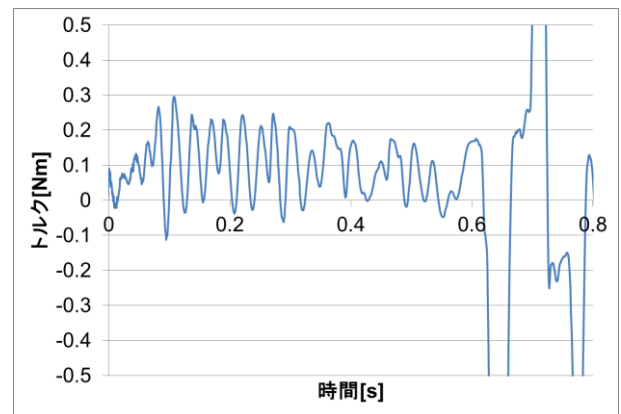


Fig.11 中心ハブのトルク時刻履歴

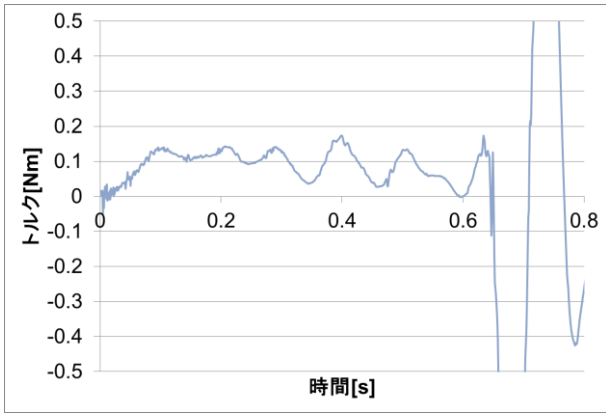


Fig.12 中心ハブのトルク時刻履歴

4-2 ハブの慣性モーメントを変化させた場合の角速度履歴

Fig.13 に中心ハブの角速度時刻履歴を示す。横軸が時間、縦軸が角速度を示しており、凡例の数字はハブに取り付けられた重りの数を示している。ハブは展開開始時刻から正方向のトルクを受け回転し、展開が終了するとブームがオーバーシュートし急速な減速が発生する。急速な減速が発生し始める時刻を展開終了時刻とした。図より、ブームの展開過程でハブの角速度の履歴に細かいピークが存在していることがわかる。これについてもブームが断続的に展開することによる影響であると考えられる。

ここで、展開トルクを一定と見なし、モデルの慣性モーメントが展開の前後で変化しないと仮定すると、理論的に展開に要する時間はモデルの慣性モーメントの平方根の逆数に比例すると考えられる。Fig.14 に縦軸を展開に要する時間、横軸をブーム収納状態モデルにおける慣性モーメントの平方根の逆数としたグラフを示す。また、回転を拘束した場合のハブは慣性モーメントが無限であると考えられるため、展開に要する時間 (0.615s) を Fig.14 にのせた。図中の直線は最小二乗法によって求めた直線である。この結果、逆数が大きい結果は理論直線よりも展開に要する時間が短くなる傾向が認められた。この原因として、収納状態モデルの慣性モーメントの平方根の逆数が大きい場合、ハブの慣性モーメントが小さく、展開の前後で慣性モーメントの変化率が大きいこと、ハブが回転しやすいこと、ハブが回転しやすいことによってブームが長手方向に進展するようになりブームへの空気抵抗が少なくなること、が考えられる。

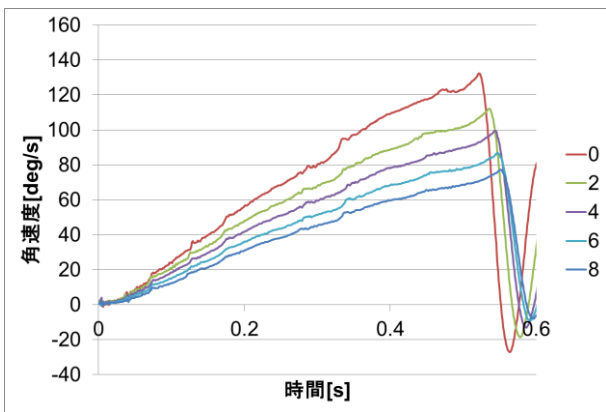


Fig.13 中心ハブの角速度時刻履歴

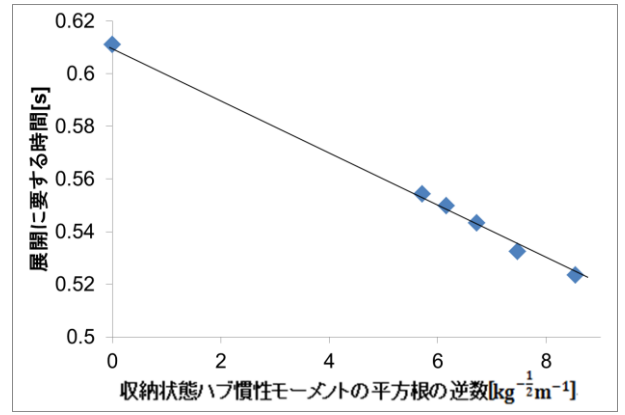


Fig.14 ハブの慣性モーメントによる展開時間の変化

5. 結言

三軸織円筒 CFRP ブームの展開がハブに与える特性として、ブームの展開によってハブに作用する反トルクを求め、ハブの角速度履歴からハブの慣性モーメントを変化させた場合の展開挙動を実験的に明らかにした。

ブーム展開によるハブに作用するトルクはブームの断続的展開と断面形状の変化によるトルクの増加によって一定ではないことが明らかになった。また、ハブの慣性モーメントが変化すると、その値が小さい場合展開挙動は単純なモデルを仮定した予想より短い時間でブームが展開する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] 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.
- [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 Aeronautical Congress, Beijing, China, pp.1-9, Sept. 2013.