

B01 ハイブリッド自己伸展円筒 CFRP ブームの大変形曲げにおける静力学特性の評価実験

仲鉢貴臣 (東京工業大学), 古谷寛 (東京工業大学), 渡邊秋人 (サカセ・アドテック)

Takaomi Chubachi (Tokyo Institute of Technology), Hiroshi Furuya (Tokyo Institute of Technology), Akihito Watanabe (Sakase Adtech)

1. 序論

ソーラー電力セイルなど、地上で収納した巨大な薄膜を宇宙空間で展開しその表面に取り付けた薄膜太陽電池による発電が検討されている。また、宇宙空間における展開膜の利用方法として、運用を終了した衛星をデオービットする手段も挙げられる。これは、あらかじめ軽量小型な膜展開構造を衛星に搭載しておくことで、運用終了時に薄膜を展開し衛星の周回速度を減速させてデオービットを実現するものである。¹⁾

宇宙用の膜展開構造では、大きく分けてスピン展開方式とブーム伸展方式と呼ばれる2種類の展開方式が考えられている。スピン展開方式²⁾は遠心力を用いて展開を行うものであり大型膜の展開に適している。一方、ブーム伸展方式³⁾は小型衛星における膜展開に有利と考えられる。ブーム伸展方式の中でも、伸展機構を用いたものは、質量ならびに収納体積の面から超小型衛星への適用は困難であるため、ブーム自身の弾性復元力を用いた自己伸展ブーム展開方法が研究されている⁴⁾。

自己伸展ブームを用いた膜展開では、膜展開に必要な十分なトルクを有することが必要である。しかし自己伸展ブームのトルク特性は、ブームの構成により複雑な挙動を有するため、実験的に定量的な評価が行われてはいるものの⁴⁾、いまだ不十分である。著者らは従来、自己伸展円筒 CFRP ブームを提案し開発を進めてきた⁷⁾。収納時に断面が大きく変形し高い収納性を有する点を膜展開へ利用する。しかしながら微小重力化での円筒 CFRP ブームの展開試験を行った際に、長期の収納に伴うトルクの低下が確認された。そこで本研究では、従来の自己伸展円筒 CFRP ブームよりも展開力とトルク減少特性を改善したハイブリッドブームの提案と、従来の自己伸展円筒 CFRP ブームを含めた収納・展開トルクに関する定量的な評価を実験的に明らかにする。

2. 自己伸展円筒 CFRP ブーム

2.1. 円筒 CFRP ブーム

著者らはこれまでの研究で CFRP を用いた円筒型のブームを提案・開発してきた⁷⁾。円筒 CFRP ブームは、Fig. 1 に示す 2 枚の半円筒状の CFRP を

向かい合わせることで円筒形状を構成しているため、断面形状が閉断面となっている。ゆえに高ねじり剛性を有している一方、半円筒 CFRP どうしの繋ぎ目をヒンジのようにして断面を潰すことが可能となっている。なおブームに CFRP を用いている理由としては、金属と比べて軽量かつ成型が容易であり、金属よりも薄肉な製作が可能であること、そしてスケールアップやスケールダウンがしやすいことにある。

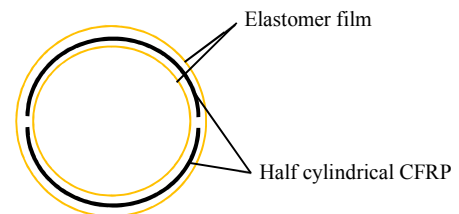


Fig. 1. The cross-section and constitution of Tubular CFRP boom.

ブームは、ハブを中心として周囲に巻き付けて収納される。逆に展開は、巻きつけられた状態から元のまっすぐな状態へ戻ることを指す。Fig. 2(a) は収納、展開時の断面変化を表し、Fig. 2(b) は巻きつけられるハブとブームの模式図である。この時、巻き付けられてブームの曲げ角度が増加する時のブームトルクを収納トルク、逆に曲げ角度が減少する時のトルクを展開トルクと表現する。

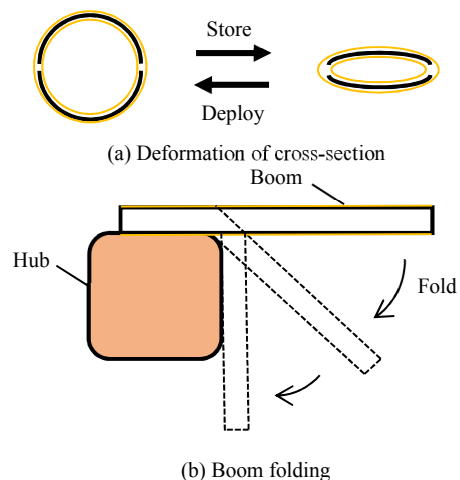


Fig. 2. Storing and deployment condition

2.2. ハイブリッド円筒 CFRP ブーム

展開トルクの増加と展開トルクの減少率低下を目的として、高い展開トルクを有する金属製コンベックステープを円筒 CFRP ブーム内に挿入した。本研究では改良した円筒 CFRP ブームを、ハイブリッド円筒 CFRP ブームとして提案し、収納・展開特性を明らかにするとともに、長期収納による展開トルクの低下特性を実験的に明らかにする。

ここで、提案するハイブリッド円筒 CFRP ブームは、Fig.3 に示すような断面を構成し、ブームを曲げた際に圧縮力がかかる面側を内側、張力がかかる面側を外側として、本論文では、内部に一枚のコンベックステープを挿入したタイプ(outer モデル)と一枚のコンベックステープを折り返してブーム両面に挿入したタイプ(bi-convex モデル)の二種類を用いる。

本構造のメリットとしては、CFRP の軽量さに加え、用いるコンベックステープの幅や厚さ、そして Fig. 3 に見られるような挿入の仕方によって柔軟にブームを製作可能であることにある。

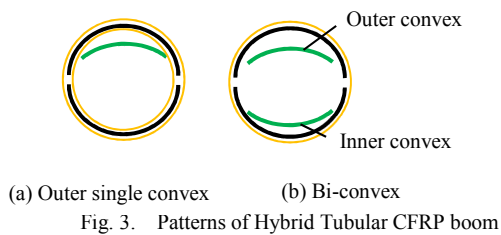


Fig. 3. Patterns of Hybrid Tubular CFRP boom

3. 固定方法

伸展ブームの固定方法により収納・展開トルクへ生じる影響が大きく異なり、固定する位置と座屈点との距離によって収納率が変化することが予備実験で示された。ゆえに、本実験では Fig.4 に示す二種類の固定方法を用いて、その影響を定量的に明らかにする。まず、完全固定方法では、ブーム固定部分の断面形状が変化しないようにブーム内にプラスチックの丸棒をいれ固定した。そして曲げによるブームの座屈点とブームの固定点を十分に離すことで固定の影響が出ないようにしたものである。一方の片側固定方法では、収納効率を実現することが可能な、ブーム片面を座屈点と近い位置で固定したものである。この両者の比較をすることで、理想的な固定条件と実利用を想定した固定条件での違いを明らかにする。

また、Fig.5 に示すように、ハイブリッド円筒 CFRP ブームの固定方法では片側固定方法を用いた。図において、(a)outer モデルの場合にはコンベックステープは固定せずに取り付けられ、(b)bi-

convex モデルでは内側のコンベックステープのみをブームとともに固定され、実験を行った。

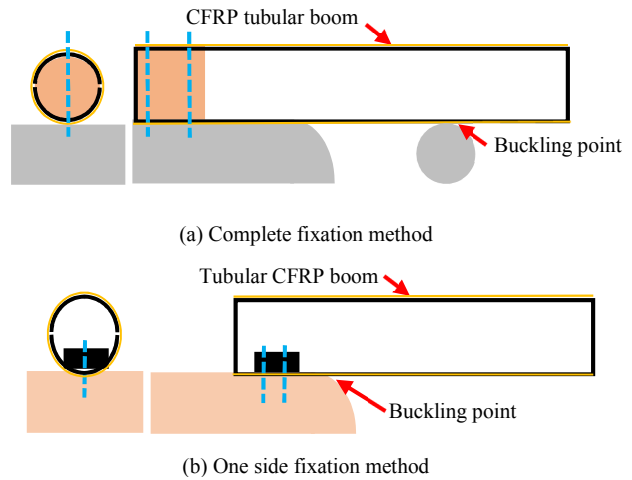


Fig. 4. Normal boom (Tubular CFRP boom)

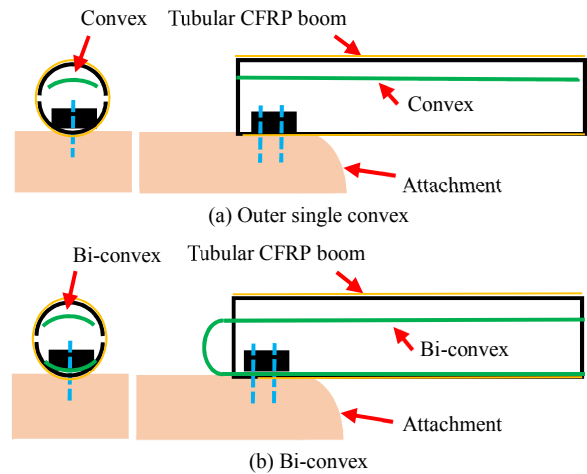


Fig. 5. Hybrid tubular CFRP boom by one side fixation

4. 自己伸展円筒 CFRP ブームの収納・展開トルク特性

4.1. 実験装置

実験では、Fig.6 に示すように、片持ち梁の曲げをベースとして先端に荷重を加えていくことで曲げモーメントを負荷する。ブームは荷重毎にある平衡状態でつりあうため、それぞれについて曲げ角度とトルクを求める。この時、ブーム先端の変形量を計測することで、ブームの幾何状態から曲げ角度とトルクは求まる。曲げ角度、トルクとブーム先端変位の関係式は Fig.7 に示す緒量を用いると、Eq. (1)~(3)のように与えられる。

$$\theta = \phi + \psi \quad (1)$$

$$T = \cos\phi (ml + ML) \quad (2)$$

$$\cos\phi = \frac{\sqrt{L^2 - (H-h)^2}}{L} \quad (3)$$

- θ : bending angle of boom from the initial condition
- ϕ : bending angle of boom from horizontal line
- ψ : initial inclination angle
- L : boom length
- M : weight
- l : length of the center of gravity from root
- m : boom mass
- T : torque
- H : height of boom fix end
- h : height of boom tip

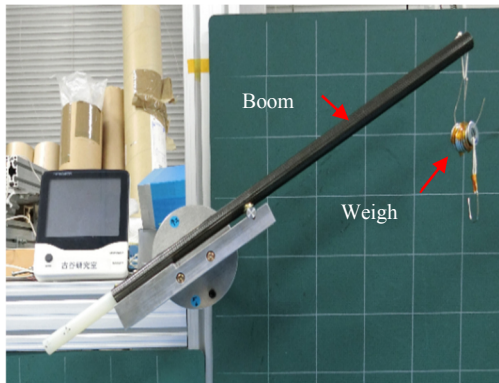


Fig. 6. Experiment setup (Complete fixation method)

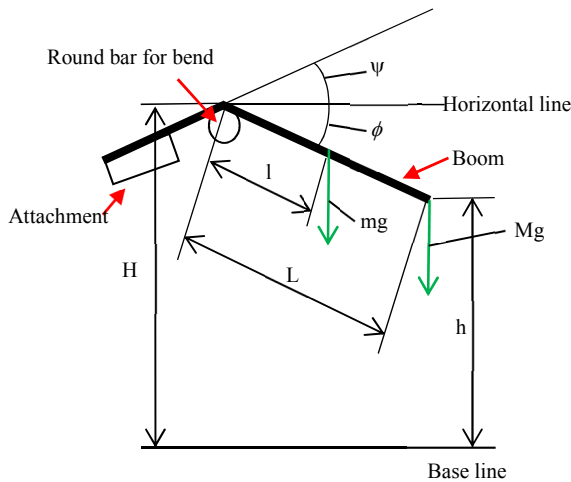


Fig. 7. Analysis model

4.2 実験手順

実験では、無負荷状態から荷重を付荷していき、断面形状が大きく変化して潰れた後、無負荷状態まで荷重を除荷する。この一連の中で、Fig.8において状態 (a)→(b)→(c) が付荷過程、状態 (c)→(d)→(a) が除荷過程である。ここで、付荷過程におけるトルクが収納トルク、除荷過程におけるトルクが展開トルクにあたる。

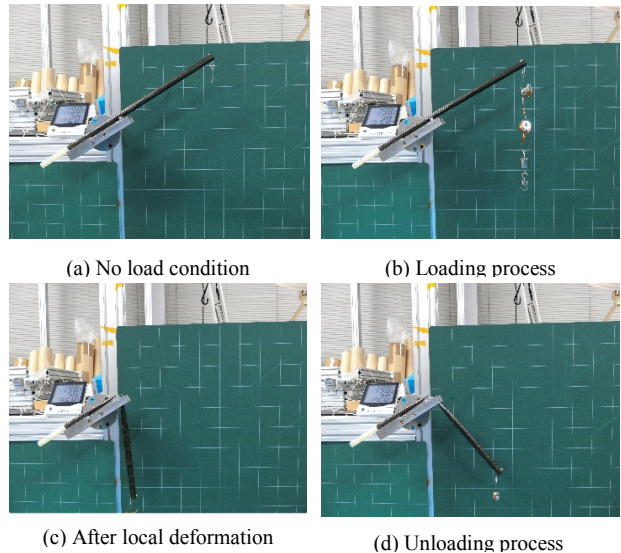


Fig.8. Loading and unloading process

4.3. 円筒 CFRP ブームの収納・展開トルク特性

4.3.1. 完全固定方法での収納・展開トルク特性

4.2 章で示した実験手順によって完全固定方法での計測を行うと、Fig. 9 に示す曲げ角度とトルクの関係が得られた。Fig. 9 中の状態(a)~(d)は Fig. 8 における各状態に対応している。Fig. 9 では、断面形状が大きく変化する際にトルクのとびうつり現象が生じている。具体的には、断面が潰れる瞬間と回復する瞬間である。そして、断面形状の違いによりそのトルクが大きく異なることが示されている。

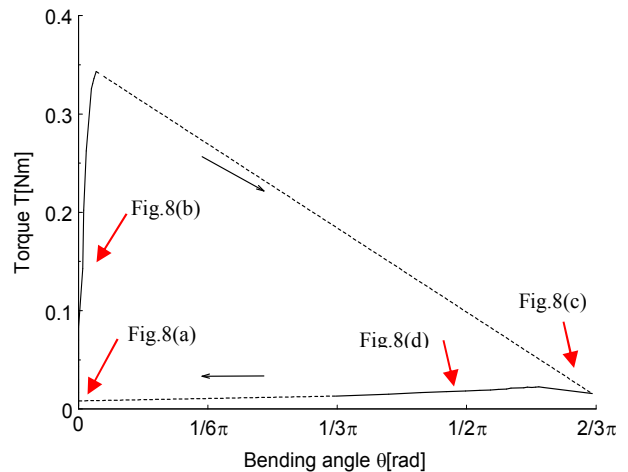


Fig. 9. Torque history for Tubular CFRP boom on complete fixation

4.3.2. 片側固定方法での収納・展開トルク特性

完全固定方法での計測を行ったことで、円筒 CFRP ブームのトルク歴を確認した。Fig.10 は、片側固定方法による計測を行い完全固定方法での結果と比較したものである。

Fig. 10 は大きく分けて二つの特徴を示す。一つは収納トルクの挙動である。二種の固定方法では、ブームを曲げ始めてから断面が潰れるまでの挙動において、座屈トルクと接線剛性に大きな差がある。一方で、展開トルクという点では値がほぼ一致している。すなわち、固定条件は収納トルクに大きな影響を与えるが、展開トルクはその影響を受けないことが示された。また、収納トルクにおける接線剛性や座屈トルクの大小を考えると、その値が小さくなる片側固定方法の方が収納しやすいといえる。

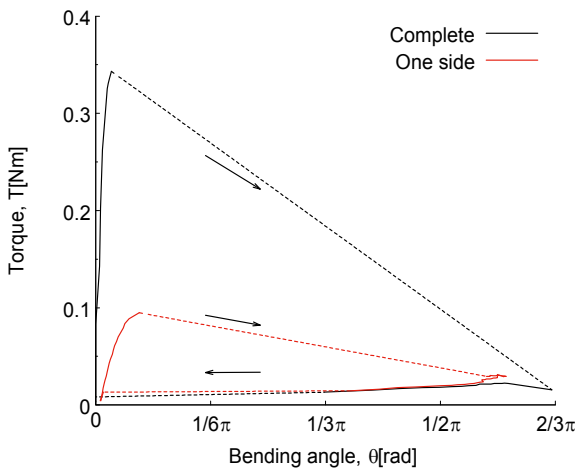


Fig. 10. Torque history on complete fixation method and one side

4.4. ハイブリッド円筒 CFRP ブームの収納・展開トルク特性

展開トルクの増加や展開トルクの減少率抑制を目的として、ハイブリッドブームを提案した。本章では、二種類のハイブリッドブームについてそのトルク挙動を確認し、金属コンベックステープを挿入したことによる影響を考える。

まずは outer モデルに関して計測を行った。

Fig.11 はその結果である。収納トルクの挙動をみると、座屈トルクが減少しているものの、接線剛

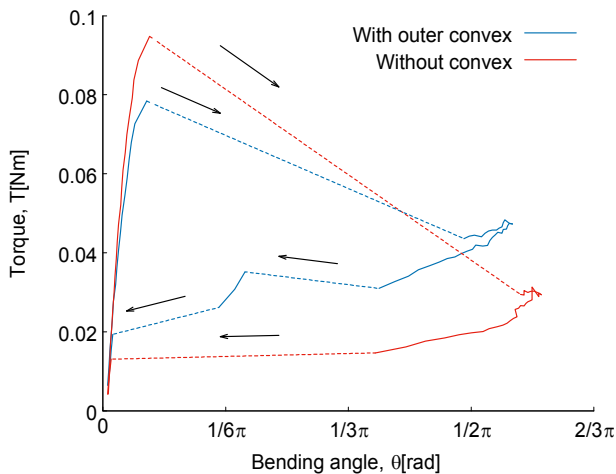


Fig. 11. Torque histories for boom only and boom with outer single convex

性は円筒 CFRP ブームと大きく変わらないことが分かる。そして、金属コンベックステープにより展開トルクは増加し、新たなとびうつり状態が生まれている。つまり、金属コンベックステープの挿入は、トルク歴を複雑化させるものの、改良の目的の一つであった展開トルクの増加を実現できている。

次に、bi-convex モデルの挙動について計測・比較を行った。Fig.12 は bi-convex モデルの挙動である。Outer モデルでは収納過程における接線剛性が円筒 CFRP ブームと一致していたが、b-convex モデルでは大きく異なっている。これは、ブームの内側面がコンベックステープによって強くなっていることによる。Outer モデルで接線剛性が変化しなかったのは、コンベックステープが外側面のみに存在しているためである。

とびうつり現象に注目してみると bi-convex モデルでは、収納・展開過程のどちらにおいても発生している。この状態を考えるために、実際にブームを曲げながら観察を行うと、新たな平衡状態はブーム内側面のみが座屈している状態にあたる事が分かる。そしてさらにブームを曲げていくと、最終的に断面は完全に潰れフラットな状態となる。すなわちブームを曲げる過程において断面形状は、だんだんと楕円になっていき、ある点で内側面が座屈した後、外側面が座屈して完全に潰れる。

Bi-convex モデルの展開トルクは、円筒 CFRP ブームの約 3 倍程度になっている。Outer モデルと比べても展開トルクはより増加しており、組み合わせ次第で様々な展開トルクを実現できることを示している。

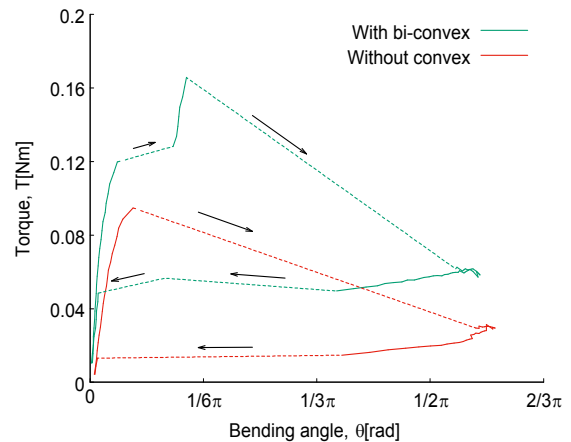


Fig. 12. Torque history for boom only and boom with bi-convex

4.5. 長期収納によるトルク減少

円筒 CFRP ブームを用いて微小重力下でのブーム・膜複合構造の展開試験を行ったところ、ブームの展開トルクが減少したことにより展開が失敗した。同様の展開実験を地上で行った際には成功していた一方でそのような結果となった原因には、収納から実際に展開を行うまでの時間が考えられる。すなわち長時間の収納に伴って、ブームの展開トルクが減少する。このトルク減少特性を評価するための実験方法としては、Fig. 8 の負荷・除荷サイクルにおける(c)の状態を t 時間維持したのち除荷を行う。

4.5.1 自己伸展円筒 CFRP ブームのトルク減少

まずは円筒 CFRP ブームと 2 種類のハイブリッドブームに関して、長時間の荷重負荷によってトルク減少が生じるかを確認する。Fig.13 は各ブームに対して微小負荷時間の展開トルクと負荷時間 168 時間の展開トルクの比較を行ったものである。Fig.13 において濃色線が各ブームについて長時間の負荷を行った結果であり、3 種全てのブームでそのトルクが減少している。しかし、曲げ角度ごとの展開トルクの減少量は一致してはいない。そこで次章では、トルク減少と負荷時間について曲げ角度ごとに比較を行う。

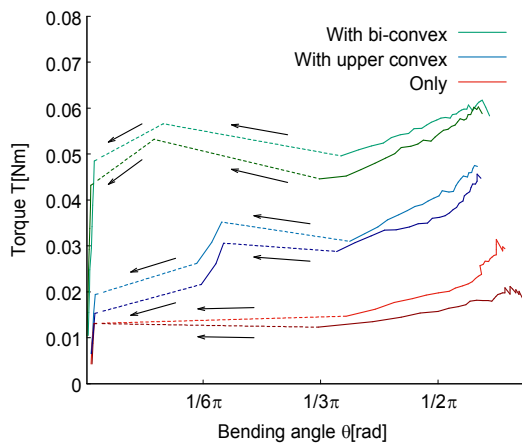


Fig.13. Torque characteristics for each boom only on no loading time

4.5.2 展開トルクと負荷時間

円筒 CFRP ブームのトルク減少量と負荷経過時間の関係を求めることで、実運用における将来的な減少後のトルクを予測することが可能となる。4.5.1 章の実験に加えて、除荷過程(d)で計測した展開トルクから曲げ角度 70,80,90[deg]における展開トルクを求める。

Fig. 14 は荷重負荷時間 $t=1-720$ [hour]における各曲げ角度での円筒 CFRP ブームの展開トルクを両対数グラフでプロットしたものである。このグラフから、展開トルクと負荷時間は両対数的に直線の関係に近似可能であり、その関係式は Eq. (4)の

ように負荷時間の累乗関数で表される。なお、各曲げ角度において累乗近似を行った結果が Table.1 である。したがって、Table.1 のパラメータと Eq. (4)から、実際に展開する際の展開トルクを求めることが可能となった

$$T(t) = Ct^a \quad (4)$$

Table. 1. Variation, a, b for tubular CFRP boom on each bending angle

	90[deg]	80[deg]	70[deg]
Exponent a	-0.0388	-0.0327	-0.0243
C[Nm]	0.0196	0.0177	0.0153

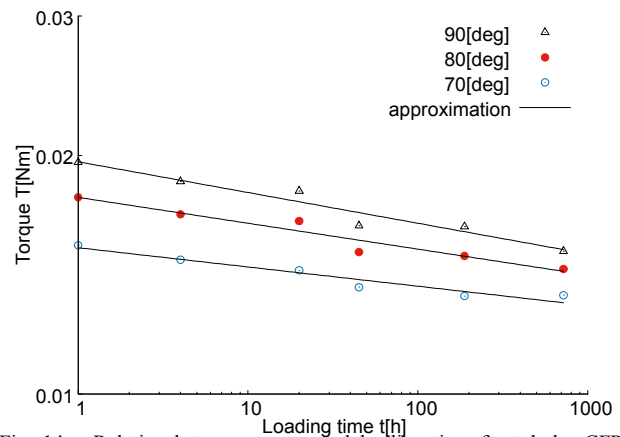


Fig. 14. Relation between torque and loading time for tubular CFRP boom on 90,80,70[degree]

また各曲げ角度における累乗係数, a の値をみると、曲げ角度が大きくなるにつれて大きくなっている。これは、曲げ角度が大きいくほど減少量が大きくなるということである。言い換えれば、負荷時間によって展開過程における剛性が低下しているということである。

同様にしてハイブリッド円筒 CFRP ブームの bi-

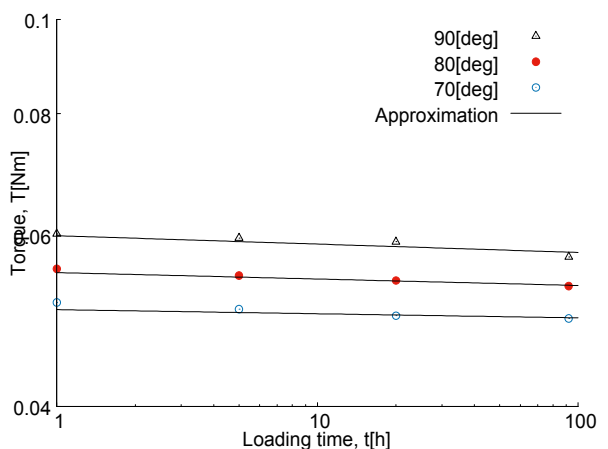


Fig. 15. Relation between torque and loading time for tubular CFRP boom on 90,80,70[degree]

convex モデルについて計測を行った。Fig. 15 をみると、bi-convex モデルにおいてもそのトルク値が負荷時間の累乗関数で表せることが分かる。

Table. 2. Variation, a, b for hybrid boom on each bending angle

	90[deg]	80[deg]	70[deg]
Exponent a	-0.0113	-0.0097	-0.0080
C[Nm]	0.0602	0.0556	0.0513

円筒 CFRP ブーム、ハイブリッドブームについて、Table.1,2 の近似関数の累係数を各曲げ角度ごとにプロットすると Fig. 16 のようになる。この図から、ハイブリッドブームでは円筒 CFRP ブームに比べて累係数, a が小さくなっている。また角度による累係数の減少率も小さくなっている。累係数の減少率は展開過程における剛性の低下率を表していることから、ハイブリッド円筒 CFRP ブームではトルク減少率が抑えられているといえる。このことは、円筒 CFRP ブーム改良の第二目的であった、展開トルク減少特性への対処を実現したということである。

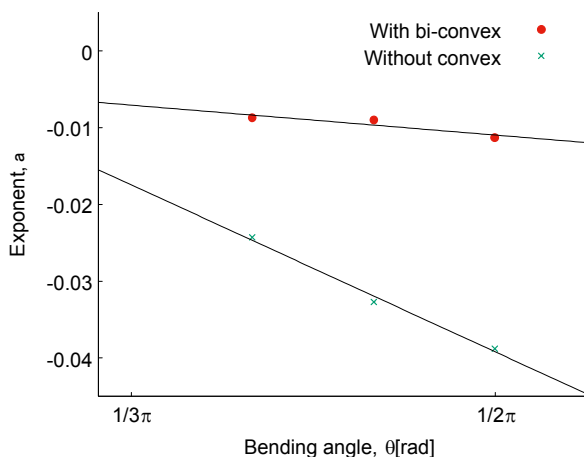


Fig. 16. Relation between exponent and bending angle

5. 結言

本研究では、展開トルクの不足や長期の収納によるトルク減少を補うためにコンベックステープと組み合わせたハイブリッド円筒 CFRP ブームの提案を行った。またブーム断面の大変形に対応可能なトルク計測法の提案を行い、ブームのトルク特性について以下のような結果が得られた。

- 1) ブームの固定条件は収納トルクの挙動に大きく影響するが、展開トルクは固定条件によらないことが明らかになった。
- 2) 組み合わせるコンベックステープの向きや厚

みを変えることで様々な展開トルクを実現できるハイブリッド円筒ブームを提案し、その展開トルクや収納時の接線剛性が増加することを定量的に評価した。

3) 長時間の負荷をかけた後の展開トルクは負荷時間の累乗で表されることが示された。

4) ブームの展開トルクの減少率は、コンベックステープによって低減されることを明らかにした。

謝辞

本研究は、IKAROS 構造専門部会の皆様のご協力をいただいた。また、科学研究費補助金(B) No.25289305 ならびに宇宙科学研究拠点形成プログラムによるものである。

参考文献

- 1) Kuwahara, T., et al.: *A Sail Deployment Mechanism for Active Prevention and Reduction of Space Debris*, Proceedings of the 62st International Astronautical Congress, South Africa, 2011, IAC-11-A6.4.7, pp.1-7.
- 2) Tanaka, K. et al.: *Development of Thin Film Solar Array for Small Solar Power Demonstrator IKAROS*, Proceedings of the 61st International Astronautical Congress, Czech Republic, 2010, IAC-10.C3.4.3, pp.1-13.
- 3) Leipold, M. et al.: *Large Membrane Antennas with Lightweight Deployable Booms*, 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies, The Netherlands, 2005, pp.1-8.
- 4) Okuizumi, N., et al.: *Stepwise Deployments of Membrane Structure with Braided CFRP Bi-Convex Booms*, 30th International Symposium on Space Technology and Science, Japan, 2015, 2015-C-28, pp.1-5.
- 5) Soykasap, Ö.: *Deployment analysis of a self-deployable composite boom*, Composite Structures 89, 2009, pp.374-381.
- 6) Sakovsky, N., Pellegrino, S., Mallikaachchi, H.M.Y.C.: *Folding and Deployment of Closed Cross-section Dual-Matrix Composite Booms*, 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, San Diego California, 2016, AIAA 2016-0970, pp.1-18.
- 7) Furuya, H., et al.: *Deployment Dynamics of Membrane-Boom Wrapped Structures*, 65th International Astronautical Congress, Canada, 2013, IAC-14-C2.3.10, pp.1-6.