

B12 OrigamiSat-1 における平織布を用いた展開膜の展開抵抗の実験的検討

仲鉢貴臣（東工大・院），古谷寛（東工大）

Takaomi Chubachi (Tokyo Institute of Technology), Hiroshi Furuya (Tokyo Institute of Technology)

1. はじめに

宇宙開発および宇宙科学研究は高度ミッションに向けて、高精度かつ多機能な宇宙機が求められる。特に宇宙探査分野では、大型構造物の建造や展開、超高精度な設計が必須となっており、剛なトラス構造ベースの展開手法のほか、柔軟な構造物として薄膜を用いた構造物も研究開発が進んでいる。これは、極めて薄い膜を宇宙で展開することで大面積の構造物を形成し利用するというもので、軽量で高い収納性を有するという利点がある。展開された薄膜の面上には、薄型太陽電池やそのためのハーネスが取り付けられ、展開後に電力確保のための発電を行うことができる。また、運用が終了した衛星で薄膜を展開させることで、衛星を減速させて地球周回軌道から大気圏に突入させて廃棄する、デオービットへの利用も考案されている。

薄膜の展開手法の中でも伸展ブームを用いた膜展開手法は遠心力展開に比べて、展開後の形状維持に有利であることや、地上における展開試験を実行しやすいこと、小型衛星への搭載には有利であることなどがある。ただし、伸展ブームを収納しておく構体が必要となる。ブーム膜複合構造は伸展ブームを用いた膜展開構造の一つであり、伸展ブームと薄膜をともに収納し展開する。^{[1], [2], [3]} 従来の伸展ブームを用いた構造では送り出しモータを用いた伸展が主であるが、本構造は収納された伸展ブーム自身の曲げ特性によって展開するため、従来の伸展ブームを用いた膜展開手法に比べて更なる軽量化・コンパクト化を実現できる。このような伸展ブームを自己伸展ブームと表現し、従来使われていたブームとは異なる展開手法であることを意味づける。Fig. 1 は小型衛星への搭載を想定し研究されていたブーム膜複合構造であり、4本の自己伸展ブームと薄膜が取り付けられ、30cmの構体に1.5m平方の薄膜が収納される。^{[1], [2]}

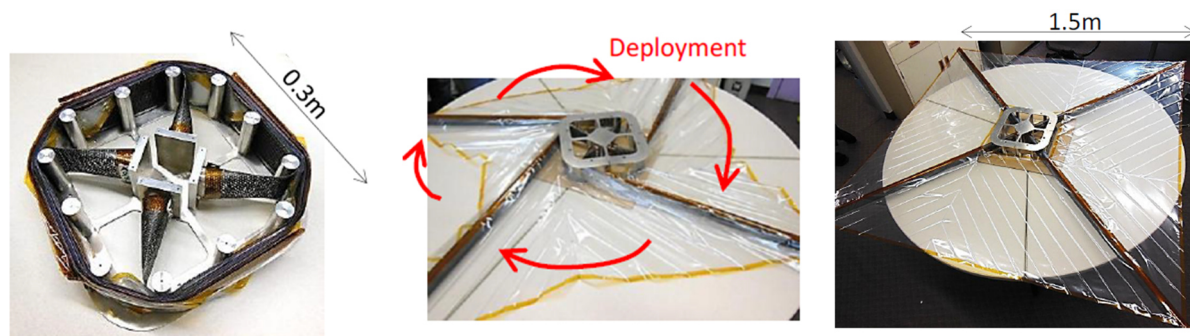


Figure 1: Boom-membrane integrated structure for small satellite ^{[1], [2]}

1. 2. 3U キューブサット OrigamiSat-1

Fig. 1 のブーム膜複合構造の展開検証を踏まえて、更なる小型化と高収納化したブーム膜複合構造が CubeSat「OrigamiSat-1」に搭載されている(Fig. 2).^[4] OrigamiSat-1 は、将来的な多機能膜構造や超大型構造が抱える問題を解決する手法の検証を目指している. たとえば、貼付デバイスの厚みを考慮した収納や、多様な薄型デバイスの実証、展開挙動の予想などであり、搭載したブーム膜複合構造の膜面上には薄膜太陽電池や SMA アンテナ、球状太陽電池が貼付されている.

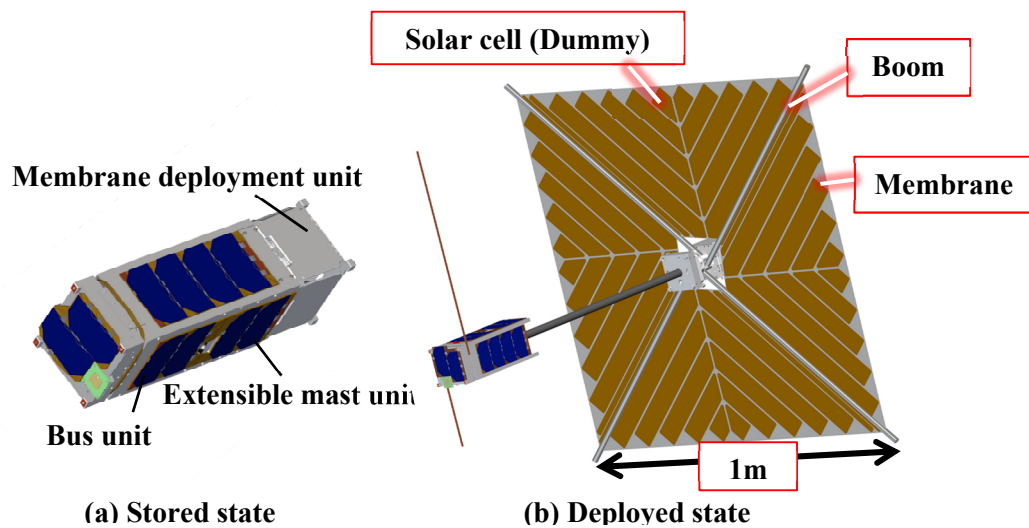


Figure 2: OrigamiSat-1^[4]

3U CubeSat「OrigamiSat-1」の開発を進めるうえで、2016年2月に航空機を用いた微小重力下における展開試験を行った.^[5] これは、航空機内にブーム膜複合構造の展開モジュールを取り付け、航空機の急降下により微小重力となっている時間中に展開試験を行うというものであった. この展開試験を通して、ブーム膜複合構造はある一定角度までは展開が進んだものの、Fig. 3-(a)のように展開が途中で停止しある状態で安定となった. ブーム膜複合構造の展開時の力学状態を検討したところ、このように意図しない平衡状態で安定となった要因は

- A) 長期の収納による円筒 CFRP ブームの展開力低下
- B) 円筒 CFRP ブームと展開膜の展開力の大小関係

であることが明らかになった.^[6]

そこで OrigamiSat-1 の開発では、それぞれの要因に対して

- A') 円筒 CFRP ブームと金属製コンベックステープを組み合わせ強化・改良
- B') より展開しやすい平織布を用いた展開膜(平織膜)を採用

することで対応した. Fig. 4 は OrigamiSat-1 のブーム膜複合構造 (EM1) で, 4 本のハイブリッド円筒 CFRP ブームを用いており, 展開膜には FM モデルでは平織布を利用している. A') の対応策については, その展開力や長期収納後の力学特性について検討しており, 意図しない平衡状態の発生に対して有効であることを定量的に確認している. ゆえに本研究では, B') の対応策である平織膜について, 従来用いられてきた PET 膜と比べてどの程度展開しやすいか評価することで, 平織膜の特徴や利点を実験的に明らかにする.

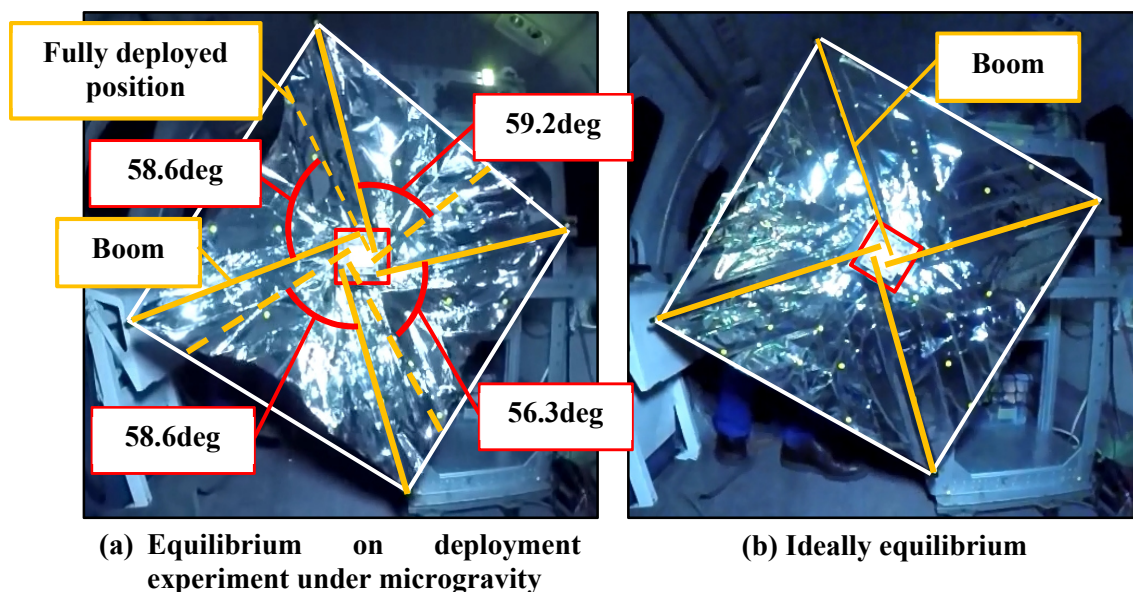


Figure 3: Deployed angle of unexpected equilibrium condition

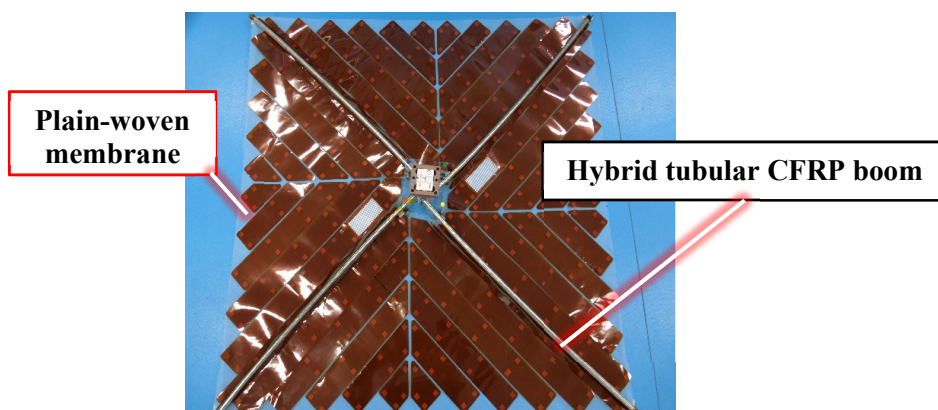


Figure 4: Boom-membrane integrated structure EM model on OrigamiSat-1

ここで, 本研究で用いた円筒 CFRP ブームおよび平織布について, それぞれ述べる.

・円筒 CFRP ブーム

本研究で用いた円筒 CFRP ブームは, Fig. 5 のような構造を有している. 2 枚の半円筒 CFRP を向かい合わせに配置し高分子フィルムで全体をぴったりと覆うことで 2 枚の半円筒 CFRP ブーム

を繋いでいる。半円筒 CFRP はコンベックステープのように大変形可能な薄肉構造であるが、半円筒な状態のままではねじりの変形モードに弱く、また横座屈を生じやすいため、2 枚の半円筒 CFRP を向い合せて高分子フィルムでつなぎ閉断面化することで強化されている。2 軸折の円筒 CFRP ブームの肉厚は $150\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ 程度であり、半円筒 CFRP に用いたカーボクロス材に大きく依存する。なお本研究で用いた円筒 CFRP は東レのカーボクロス CO6142(ブーム肉厚 $200\mu\text{m}$ モデル) である。円筒 CFRP ブームは、まっすぐな状態から曲げられると、その断面は Fig. 6 のように徐々に円形から楕円形に潰れていき、一定の曲げ角度を超えると完全にフラットとなる。そして除荷されると、曲げられた角度が元のまっすぐな状態に戻りながら、断面も円形に回復する。

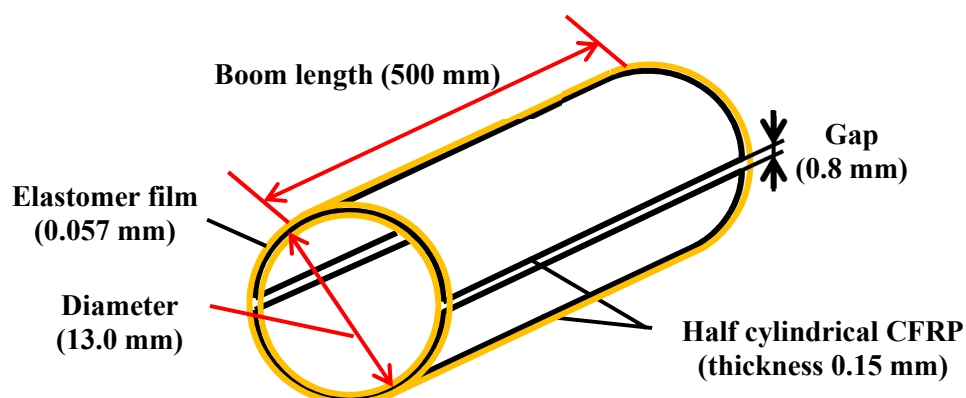
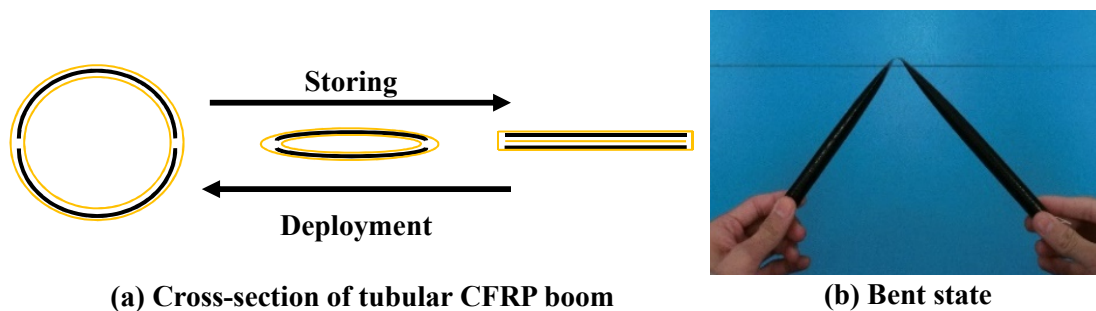


Figure 5: Tubular CFRP boom



(a) Cross-section of tubular CFRP boom

(b) Bent state

Figure 6: Bent tubular CFRP boom

・平織布

平織布は Fig. 7-(a)のように二軸の繊維を上下交互に編んで構成されている。そのため、展開しやすいほか、布の伸びによる収納しやすさ、折り目がつきづらいことによる展開後形状のフラットさ等が利点として定性的に挙げられる。OrigamiSat-1 では平織布として天池合織株式会社の「天女の羽衣」を用いている。(Fig. 7-(b))

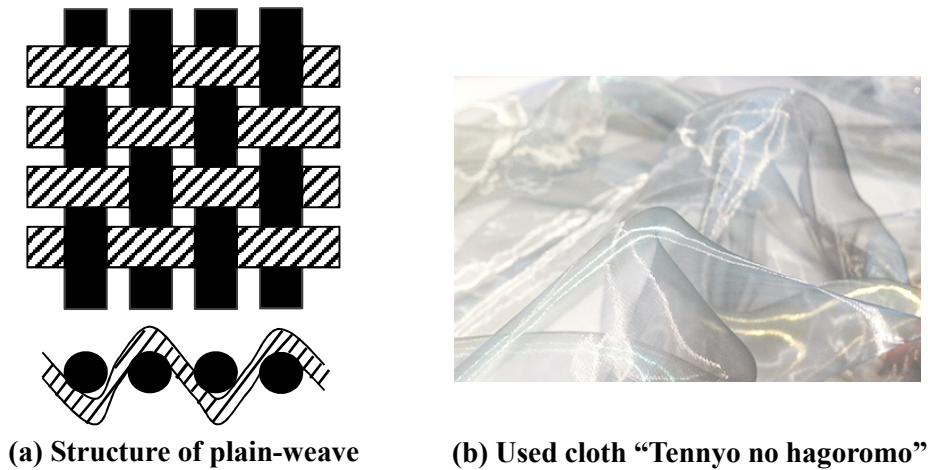


Figure 7: Plain-woven cloth

2. ブーム膜複合構造の力学解析モデルと計測手法

本研究では PET 膜に比べて平織膜がどの程度展開しやすいかを考えるにあたり，ブーム膜複合構造の展開力から検討する．

2. 1. ブーム膜複合構造の力学解析モデル

ブーム膜複合構造の力学解析モデルを構築するために，まずはブームと膜それぞれの力学特性を定める．円筒 CFRP ブームは曲げられた状態から解放すると，Fig. 8 のように完全に伸展する．これは，曲げによってひずみが生じ変形に対する弾性力として働くためであるが，ブーム膜複合構造ではこのような特性を利用して展開を行う．すなわち，円筒 CFRP ブームは曲げられた状態において正の展開力を持っているとみなすことができ，曲げによって生じるモーメントが展開力にあたる．

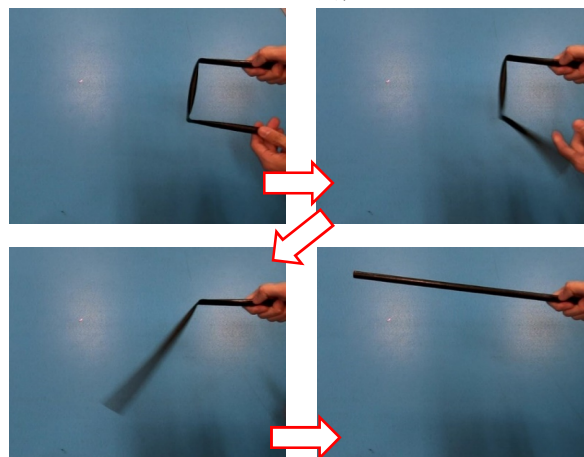
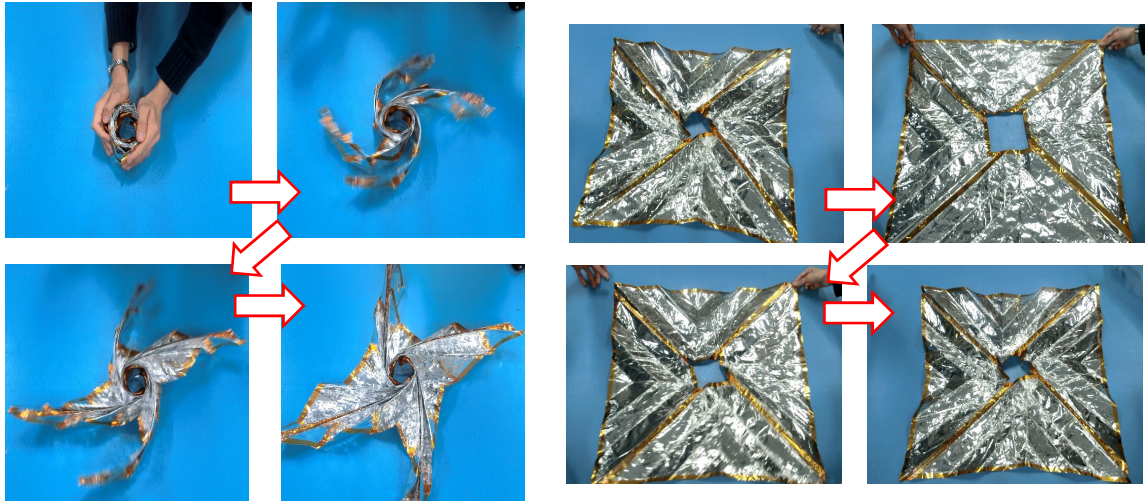


Figure 8: Deploying tubular CFRP boom

一方の展開膜も円筒 CFRP ブームと同様に，収納状態から解放すると展開を始める．しかしながら，このように自然に展開し始めた展開膜は，Fig. 9-(a)のように途中で展開が止まる．これは展開膜が巻き付けによって展開力を有しているということである．しかし，Fig. 9-(a)の状態からさらに展開するためには，外力が必要となる．Fig. 9-(b)は，外力によって展開膜を開く様子であり，展開膜を完全に展開した状態に維持す

るには外力を加え続ける必要がある。すなわち、展開膜には、展開に対して抵抗を有していると考え、これを展開抵抗と表現することにする。展開抵抗は、抵抗を妨げる方向に働く力であるため、展開力とは正負が異なる。



(a) Natural deployment from stored state

(b) Natural shrink from fully deployed state

Figure 9: Deploying behavior of membrane

これらの結果から、ある状態のブーム膜複合構造の力学解析モデルを次のように考える。円筒 CFRP ブームは曲げによりモーメント T_b を有しており、展開膜はセンターハブ周りに展開抵抗 T_R を有しているとする。Fig. 10-(a) 中のように、曲がった状態の円筒 CFRP ブームは展開方向に働く曲げモーメント T_b を有していることから、円筒 CFRP ブームの先端で $f_B \left(= \frac{T_B}{l_1} \right)$ の展開力を有する。(Fig. 10-(c)) 一方で展開膜は膜の四隅でブーム先端と接続されているので、ブーム先端での抵抗は $\frac{1}{4}f_R \left(= \frac{T_R}{l_2} \right)$ となる。(Fig. 10-(d)) よってブーム先端におけるブームと膜の展開力の合計は

$$f = f_B - \frac{1}{4}f_R \quad (1)$$

で表される。(Fig. 10-(e)) 以上よりブーム膜複合構造がセンターハブ周りに有する展開トルク T は

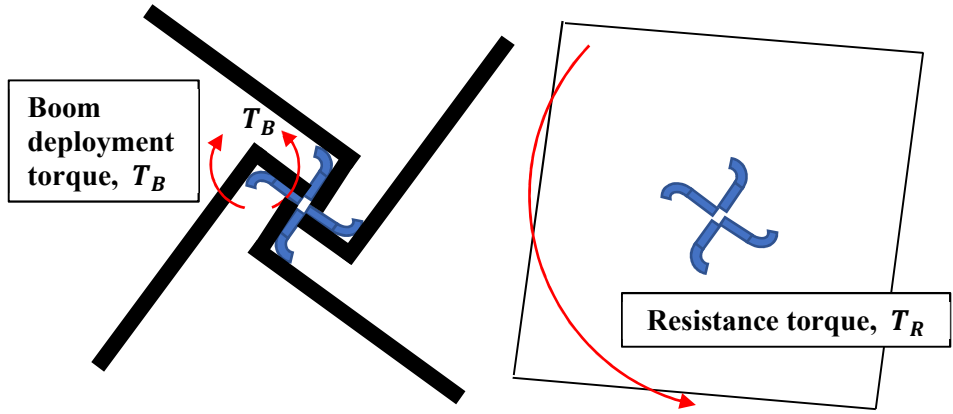
$$T = 4fl_2 = 4l_2 \left(f_B - \frac{1}{4}f_R \right) \quad (2)$$

である。ここで、実験装置では $l_1 \approx l_2$ であるから

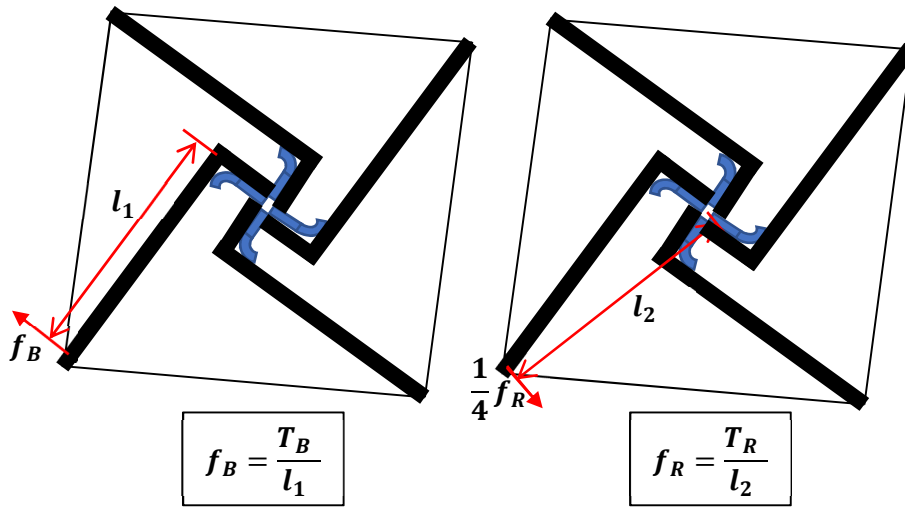
$$T \approx 4T_b - T_R \quad (3)$$

で表すことができる。(Fig. 10-(f)) 以上から、ブーム膜複合構造全体の展開力は、センターハブを中心とした回転運動として、ブームと展開膜がセンターハブに及ぼすトルクで考えることができる。

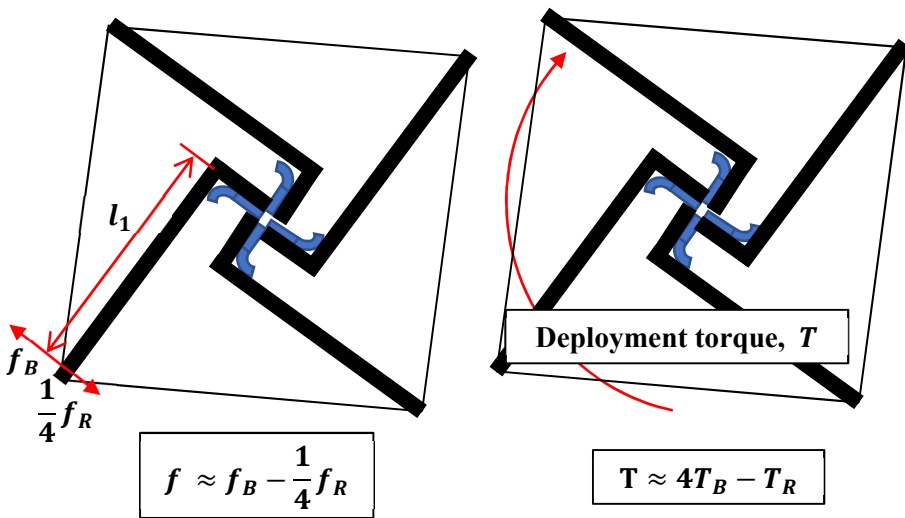
また本章では、展開過程における、ブーム膜複合構造の展開状態を表現する手段として、センターハブの回転量を用いる。完全に展開した状態を角度 $\theta = 0[\text{deg}]$ として、ある展開状態のブーム膜複合構造は何度回転すれば完全に展開するのかを角度 θ とする。(Fig. 11)



(a) Boom deployment torque (b) Resistance torque of membrane



(c) Deployment force of boom at boom tip (d) Resistance force of membrane at boom tip



(e) Total deployment force at boom tip (f) Total deployment torque

Figure 10: Analysis model of boom-membrane integrate structure

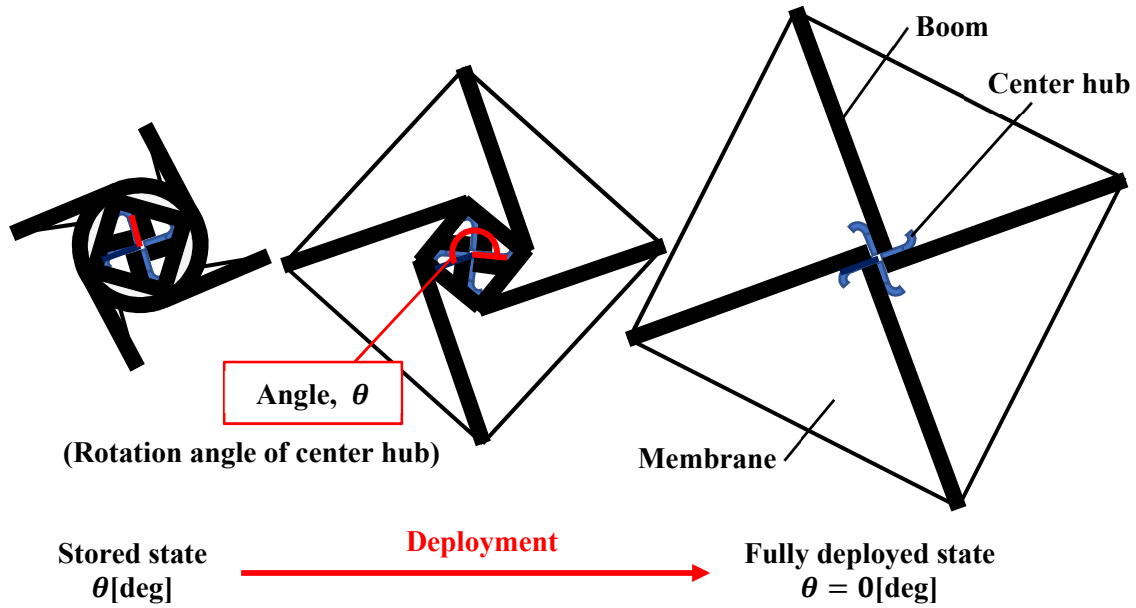


Figure 11: Definition of angle on boom-membrane integrated structure

2. 2. 展開トルク計測装置

本研究では平織膜の展開しやすさについて、その展開抵抗を算出し、同サイズの PET 膜の展開抵抗と比較することでどの程度展開しやすくなっているのかを定量的に考える。Fig. 12-(c)は平織膜を取り付けたブーム膜複合構造で、Fig. 12-(b)は比較対象となる PET 膜のブーム膜複合構造であり、両者は同一の円筒 CFRP ブームを用いている。(Fig. 12-(a)) 平織膜は折り目がつきづらいため、折り目を避けてダミーデバイスを膜面に貼り付けることで折り目以外の曲げ剛性を高めて収納しやすくしている。比較対象である PET

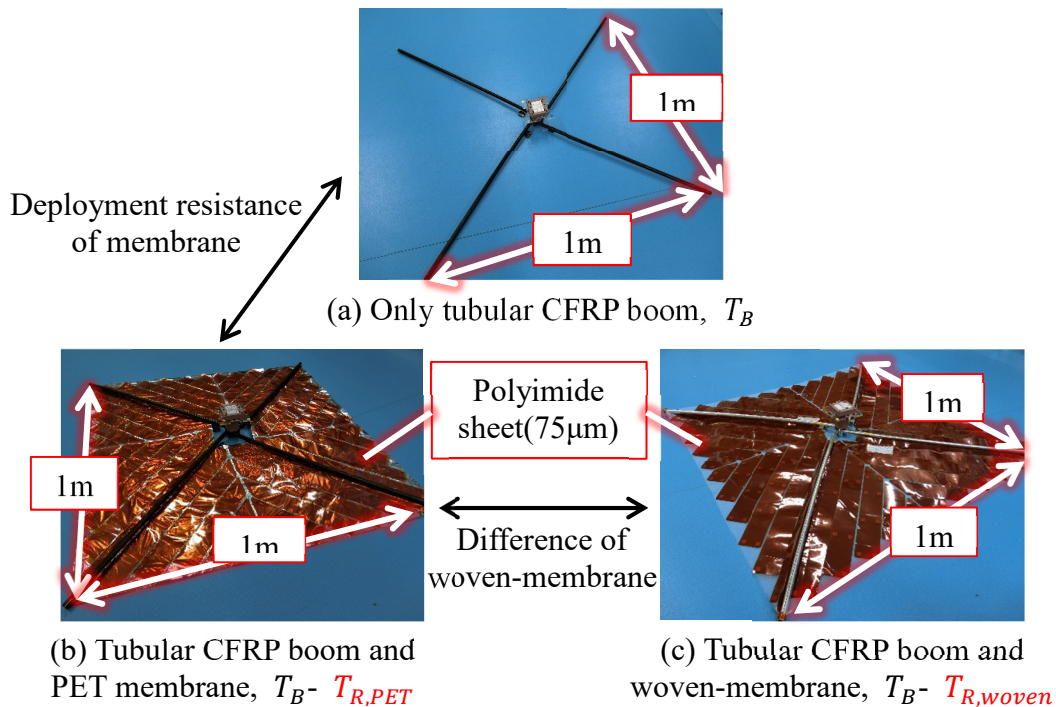


Figure 12: Test type for comparing PET membrane with plain-woven membrane

膜も同条件にするために、膜面にダミーデバイスを貼り付けている。Table 1 は両膜面の諸条件をまとめたものであり、質量については膜面に貼られたダミーデバイス分を含んでいる。

Table 1: Configurations of membrane

	Thickness [μm]	Weight (only membrane) [g]	Weight (with polyimide) [g]
(b) PET membrane	12.5	20	122
(c) Woven membrane	80	26	128

2. 3. 展開トルク計測装置

前節で構築した力学解析モデルをもとに、ある角度状態においてブーム膜複合構造が有する展開トルクを計測する装置を Fig. 13, Fig. 14 に示す。これは、外力を与えず準静的にブーム膜複合構造を展開させることができる装置である。中央から 4 方向に伸びたレールにはそれぞれ Fig. 15 のローラーユニットが取り付けられており、レール上のみを自由に移動することができる。ローラーユニットはレール上を移動するためのベアリング 8 つのほか、レールに平行に伸びたスパーサが取り付けられている。

実験では、収納されたブーム膜複合構造を中央の試験台に取り付け、4 本の自己伸展ブームを 4 方向のローラーユニットに取り付ける。中央の試験台とハンドルがついた回転台は力覚センサでつながっており、

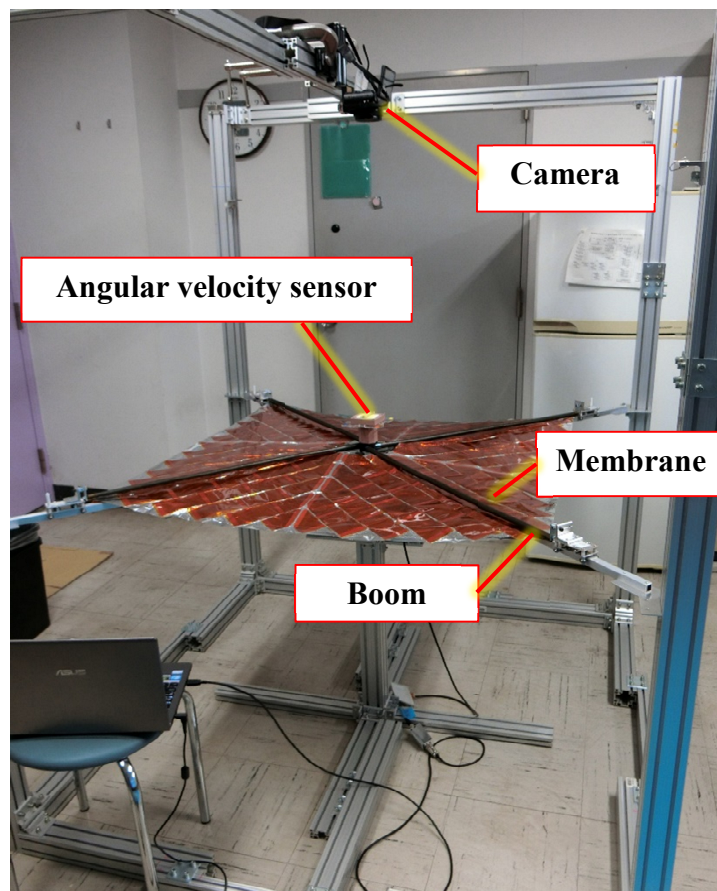
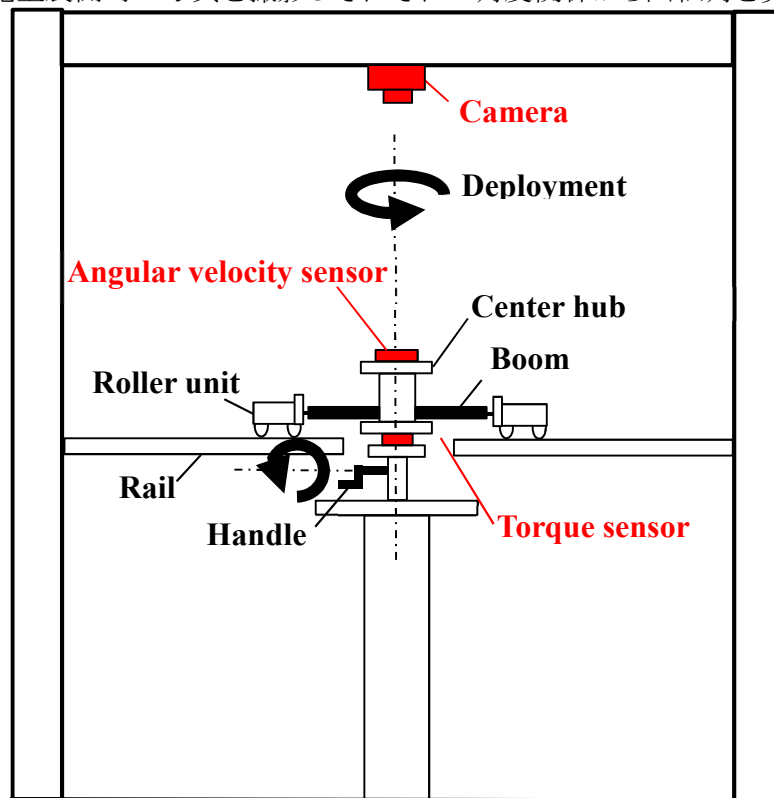


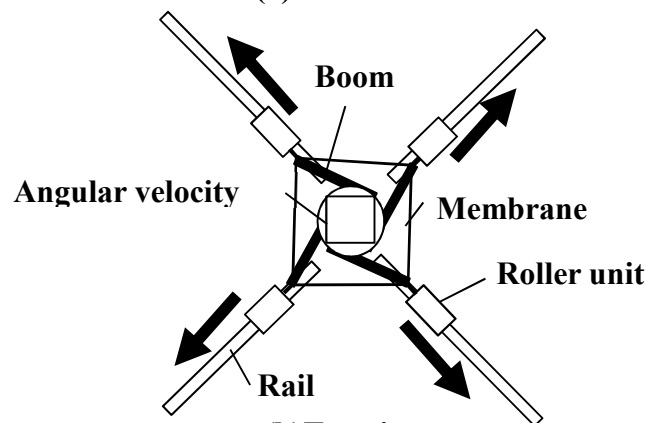
Figure 13: Experimental setup for measuring deployment torque of boom-membrane integrated structure

試験台に加わるトルクを計測することができる。試験台上のブーム膜複合構造は展開しようと展開力をローラーユニットに加えるが、ローラーユニットはレール長手方向にしか移動しないため、その角度形状のままとなる。そして力覚センサには展開力の反力がトルクとして計測される。試験台と回転台はハンドルを回すことで少しずつ回転するため、Fig. 16のように徐々にブーム膜複合構造を展開させることができる。このように力覚センサによって、収納状態から完全に展開するまでの過程での展開トルクを計測できるようになる。

一方ブーム膜複合構造の角度状態は、中央に取り付けた角速度センサと、真上から撮影した動画によって算出する。角度の算出には主に角速度センサの角速度値の積分を用いるが、センサを回転させていない場合でも恒常的に僅かな正值を記録しているため、積分時には誤差を生じる。一方計測開始時と計測終了時、そして完全展開時の写真を撮影しそれぞれの角度関係から回転角を算出することも可能であ



(a) Side view



(b) Top view

Figure 14: Setup model

る。角速度値の積分による誤差は計測点数に依存するが、角速度センサを 500Hz で用いて 60sec 間に 700-800deg の回転を行ったところ、積分値と画像取得値では 2-4deg 程度の誤差であった。そこで、画像から得られた計測終了時角度で、角速度の積分値で得られた計測終了時角度を修正し、計測時刻に対する角度を算出した。

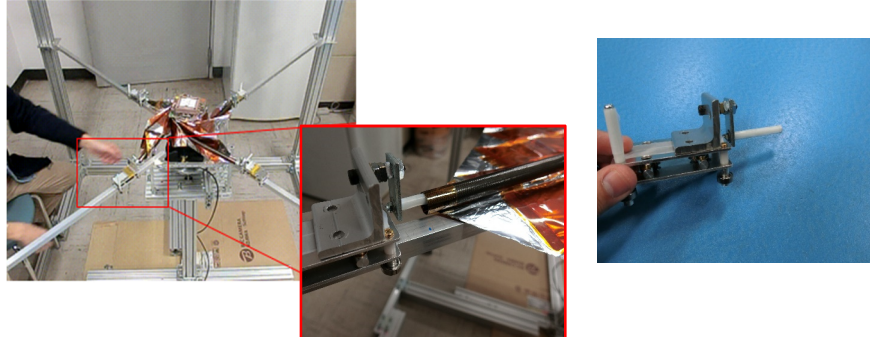


Figure 15: Roller unit

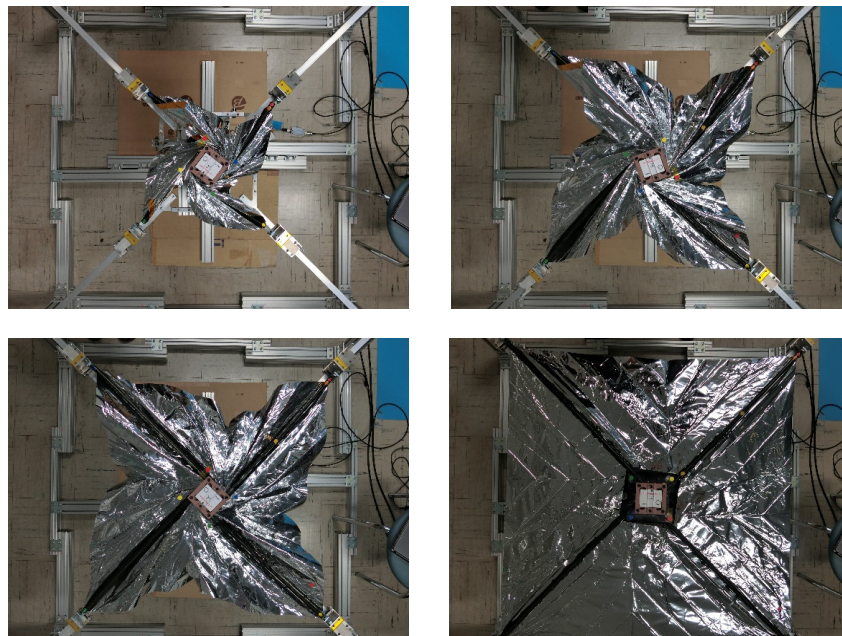


Figure 16: Boom-membrane integrated structure during experiment

2. 4. 膜の垂れ下がりにより生じるトルク

膜面に取り付けられたダミーデバイスの重量によって、展開トルク計測時には薄膜が Fig. 17 のように垂れ下がるため、このように垂れ下がった薄膜が展開トルクの計測値に与える影響を算出する。薄膜 1 ペタルの垂れ下がり懸垂線状の紐と仮定し、その座標系を Fig. 17 で定義する。この時、xz 平面($x \geq 0, z \geq 0$)における紐の自重と円筒 CFRP ブームにかかる力のつりあいは、円筒 CFRP ブームにかかる張力を F 、xz 平面($x \leq 0, z \geq 0$)における紐にかかる張力を H として、Fig. 18 のようになる。これを x 軸、 z 軸方向に分解しそれぞれのつりあいを考えると

$$\text{x軸 : } H = F \cos \theta \quad (1)$$

$$\text{z軸 : } w s g = F \sin \theta \quad (2)$$

となる。ただし w は紐の単位長さ当たりの質量、 s は $0 \leq x \leq X$ の紐の全長である。

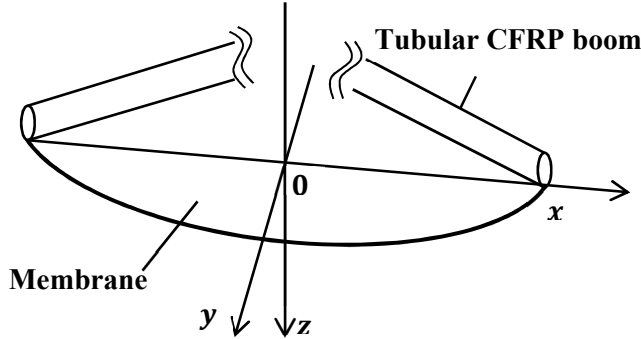


Figure 17: Hung model of membrane when measuring

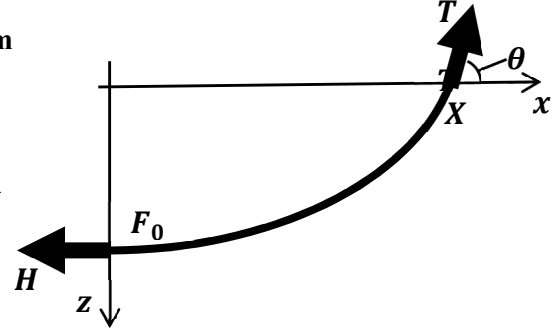


Figure 18: Catenary model of hung membrane

xz 平面において懸垂線状の紐を x の関数で表すと

$$F(x) = \frac{1}{2a} (e^{ax} + e^{-ax} - 2) \quad (3)$$

$$x = X, F(X) = 0 \quad (4)$$

$$x = 0, F(0) = F_0 \quad (5)$$

でありこれを用いて x 軸, z 軸方向の張力はそれぞれ

$$H = F \cos \theta = \frac{wg}{a} \quad (6)$$

$$F \sin \theta = wg \frac{a}{2} (e^{ax} - e^{-ax}) \quad (7)$$

となる。なお a は式(7), (8)で表される式(6)の境界条件を満たす懸垂線のパラメータである。求めた張力 F を xyz 座標系に記載すると, Fig. 19 のようになる。Fig. 20 は, この状態を xy 平面 z 軸正方向へみた図で, ブーム長手方向にかかる荷重は円筒 CFRP ブームにかかる張力 F を用いて $F \cos \theta \cos(\frac{1}{4}\pi)$ に分割される。以上から, 膜の自重が垂れ下がりによってセンターハブに及ぼす展開トルク T_g は, 円筒 CFRP ブームの巻き付け半径 r を用いて

$$T_g = 2F \cos \theta \cos\left(\frac{1}{4}\pi\right) r \times 4 = 4\sqrt{2} \frac{wg}{a} r \quad (8)$$

で表すことができる。ただし, 膜質量 w と巻き付け半径 r は展開に伴って変化するため, 計測値にしたがって次のようなモデルを定めた。

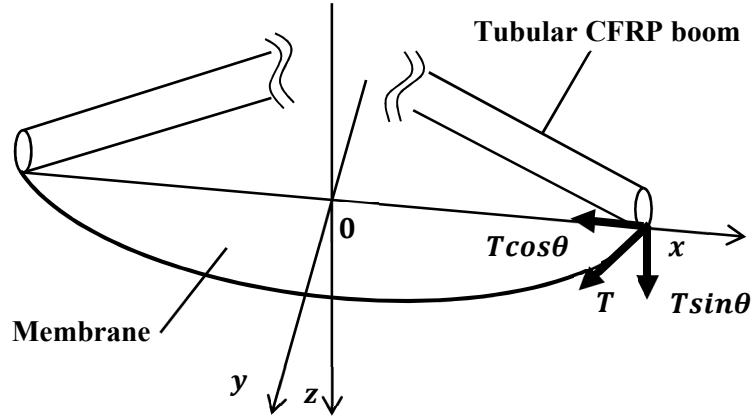


Figure 19: Force which boom is subjected to hung membrane

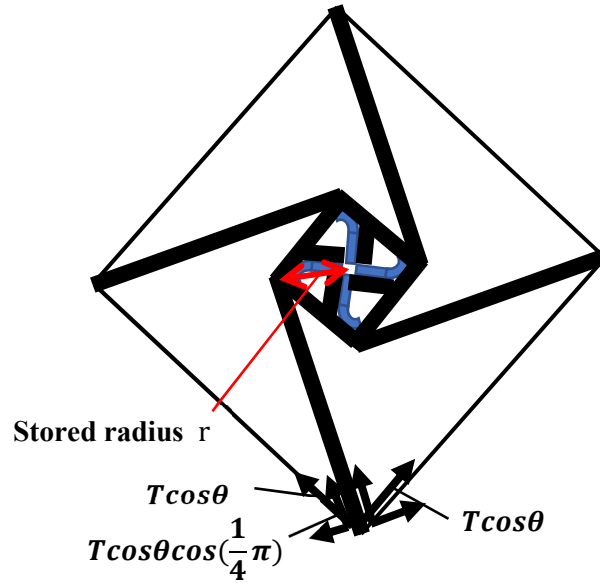


Figure 20: Top view of force which boom is subjected to hung membrane

・膜質量wモデル

膜質量モデルを定めるにあたり, ある角度状態において垂れ下がった膜の質量を計測し, 膜が垂れ下がりを始める角度($-450\text{deg} \leq \theta \leq 0$)における膜質量モデルを以下のように定めた.

$$w [\text{g}] = 10 \left(1 + \frac{\theta}{450} \right) + 5 \quad (12)$$

・巻き付け半径rモデル

ブームはセンターハブへの巻き付け状態に伴ってその巻き付け半径が変化する. 何周も巻き付けられた状態では $r = 25\text{mm}$ であり, 曲げ角度 $\theta = -90\text{deg}$ を境にして巻き付け半径 r は大きく減少し, 曲げ角度 $\theta = 0\text{deg}$ で $r = 10\text{mm}$ となる. そこで式(13)のように巻き付け半径 r モデルを立てた.

$$r [\text{mm}] = \begin{cases} -90\text{deg} \leq \theta \leq 0, & r = 25 \\ \theta \leq -90\text{deg}, & r = 10 + 15 \left(\frac{\theta}{-90} \right) \end{cases} \quad (13)$$

3. 平織膜の展開抵抗

Fig. 13 の実験装置を用いて、円筒 CFRP ブームの展開トルク、ブーム膜複合構造の展開トルクを計測することでその差分から展開膜の展開抵抗を算出した。Fig. 21 は、(a) 円筒 CFRP ブーム、(b) ブーム+PET 膜、(c) ブーム+平織膜の展開トルク計測結果である。そして、(a)と(b)の結果、(a)と(c)の結果をもとに、PET 膜と平織膜の展開抵抗をそれぞれまとめたものが Fig. 22 である。

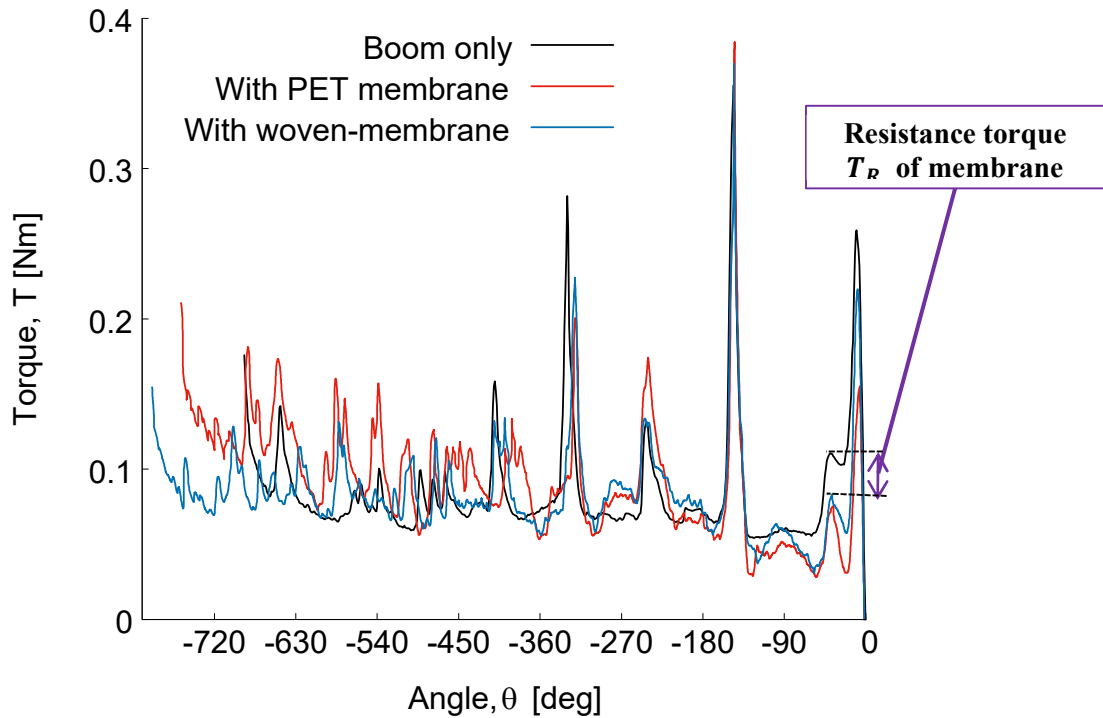


Figure 21: Resistance torque of PET membrane and woven-membrane

Fig. 22 をみると、展開直前において抵抗が最大となる瞬間では、PET 膜に比べて平織膜の展開抵抗は 45.7%に低下している。そして両者の比較をより明確に考えるため、得られた展開抵抗を式(14)で線形近似した。

$$T_R = a\theta + b \quad (14)$$

PET 膜と平織膜の展開抵抗を線形近似した結果が Fig. 23 と Table 2 であり、この近似結果においてその傾き a は 28.3%に低下している。以上より、平織膜はその展開抵抗について、最大値および展開抵抗の接戦剛性が PET 膜よりも低下していることが分かる。

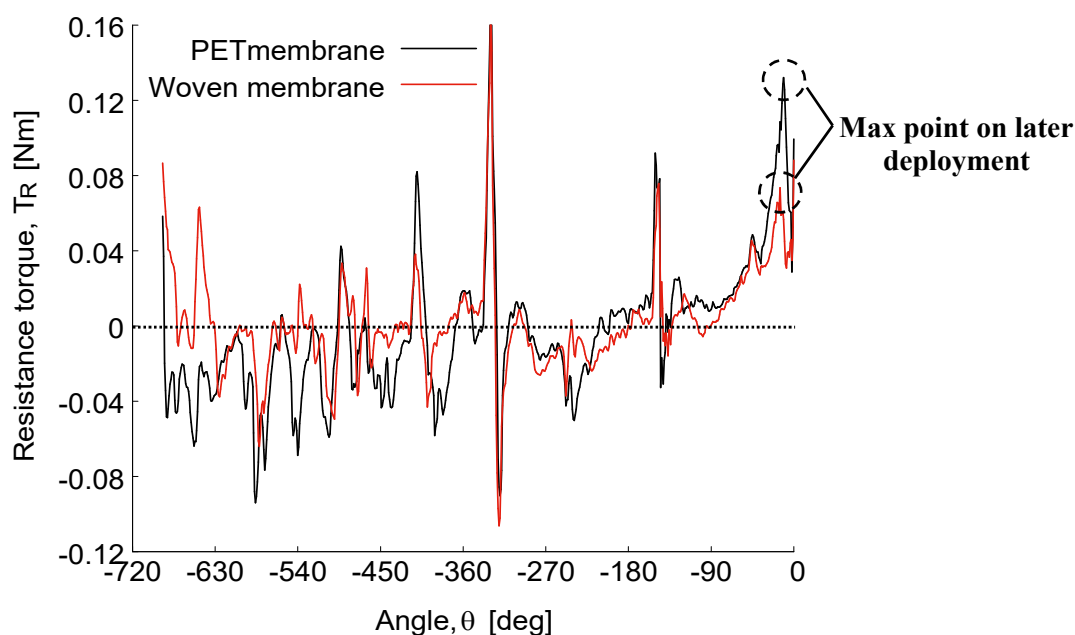


Figure 22: Resistance torque of PET membrane and woven-membrane

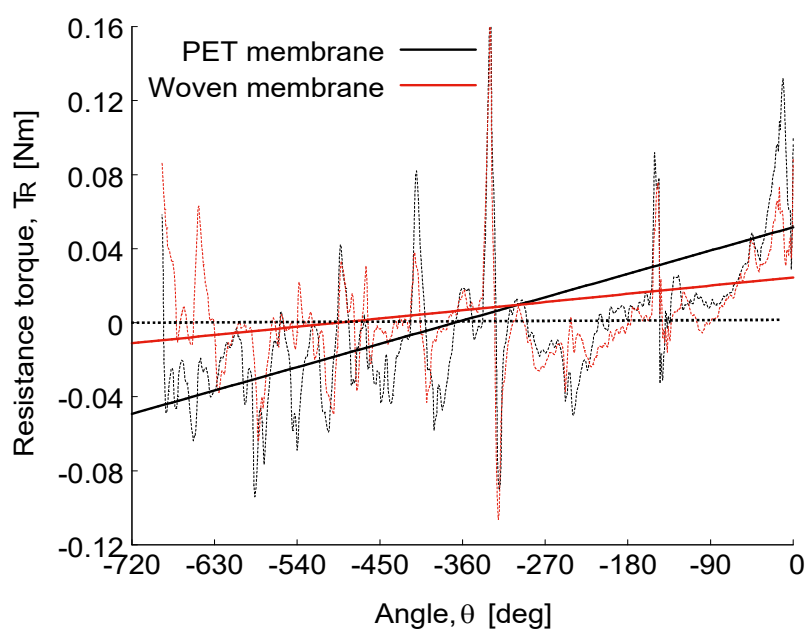


Figure 23: Linear model of resistance torque

Table 2: Approximated parameter on resistance torque

	a	B
PET membrane	0.00014	0.05159
Woven membrane	0.00005	0.02449

4. PET 膜と平織膜の機械特性

前章から平織膜の展開抵抗が PET 膜に比べて小さいことが定量的に示された。本章ではその特性が平

織膜の物理パラメータに依るのかについて検討する.

4. 1. 平織布の繊維密度

用いた天女の羽衣について, その面密度は $18\text{g}/\text{m}^2$ であり, 材質はポリエステルであることから材料密度を $\rho = 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ とする. 膜厚みは $t = 80\mu\text{m}$ であるから, 繊維を直径 $D = 40\mu\text{m}$, 長さ $L = 1\text{m}$ の円柱として考える.

1m^2 の膜に折られている繊維の本数を N 本とすると, 膜の質量 $M[\text{g}]$ は

$$M = \rho \frac{1}{4} D^2 \pi L N \quad (15)$$

である. よって繊維本数 N 本は

$$N = \frac{M}{\rho \frac{1}{4} D^2 \pi L} \quad (16)$$

で表すことができる. これを計算すると $N \cong 12000$ 本であり, 平織布には縦軸と横軸の繊維があるため, 1 辺の繊維数は $\frac{1}{2}N \cong 6000$ 本である. したがって, 見かけ上 1 辺 1m の繊維布に含まれる繊維断面長 L_f を

$$L_f = ND \quad (17)$$

とすると $L_f = 0.24\text{m}$ である.

4. 2. 力学モデルに基づく機械特性の比較

・曲げ剛性

Fig. 24-(a)は曲げ剛性計測試験を行うモデルである. 平織膜と PET 膜の膜片をそれぞれ片持ち梁のように固定し, その垂れ下がり具合から曲げ剛性 G を算出する. この時, 垂れ下がり角度 ϕ から

$$G = \frac{\cos\left(\frac{1}{2}\phi\right)}{8\tan\phi} W l^3 \quad (18)$$

W :膜の単位面積当たり質量, ϕ :膜の垂れ下がり角度, l :膜試験片長さ

である. 本手法は文献[7]を参考に行った. そして Table 3 はこの試験を通して得られた, 平織膜と PET 膜の曲げ剛性 G である.

Table 3: Calculated value of bending stiffness

	Woven membrane	PET membrane
Bending stiffness G [N/m]	9.8×10^{-6}	1.22×10^{-6}

・引張剛性

Fig. 24-(b)は引張剛性の算出を行うモデルである. 平織膜と PET 膜の膜片を長方形断面として引張剛性 H を式(4.11)から算出する. この時, 各材料のヤング率 E は先の曲げ剛性 G を長方形断面としてその膜厚

t から $E = \frac{bG}{I} = \frac{bG}{\frac{1}{12}b_r t^3}$ として算出することで求めた値 Table 4 を用いた. ただし膜幅 b について PET 膜は $b = b_r = 1$ としたが, 平織膜の繊維密度は 0.24 であるため $b = 1, b_r = 0.24$ とした. これは b と b_r の由来が, 質量と断面積で異なっているためである. 式(19)と Table 4 をもとに得た引張剛性が Table 5 である.

$$H = Ebt \quad (19)$$

E : ヤング率, b : 膜幅, t : 膜厚

Table 4: Calculated Young's modulus

	Woven membrane	PET membrane
Young's modulus E [N/m ²]	0.9×10^9	7.5×10^9

Table 5: Calculated value of tensile stiffness

	Woven membrane	PET membrane
Tensile stiffness H [N]	18×10^3	93×10^3

・折り目剛性

折り目剛性 C を比較するものとして, 文献[8]を参考に Fig. 24-(c)の曲がり梁モデルを用いた. 曲がった状態にある梁を曲げるときに必要な曲げモーメントの, 曲がり角度に対する係数から式(20)のように検討する.

$$C = Eb \frac{rt^3}{t^2 + 12r^2} \quad (20)$$

E : ヤング率, b : 膜幅, r : 折り目曲率, t : 膜厚

である. 曲がり梁モデルでは, 曲がり状態の曲率半径 r に大きく依存するため, 収納された状態にある PET 膜と平織膜から計測した参考値として $r_{\text{woven}} = 1\text{mm}$, $r_{\text{PET}} = 50\mu\text{m}$ を用いた. そして Table 6 はこの試験を通して得られた, 平織膜と PET 膜の折り目剛性 C である. この時, 膜幅 b は引張剛性 H の検討と同様に PET 膜を $b = 1$ として平織膜の繊維密度から $b = 0.24$ とした.

Table 6: Calculated value of crease stiffness

	Woven stiffness	PET membrane
Crease stiffness C [Nm]	0.94×10^{-2}	2.41×10^{-2}

以上の各機械特性について, PET 膜に対する平織膜の計測値の比率をまとめたものが Table 7 である. 先章で得られた実験値と比較すると, 面内剛性と折り目剛性が有意であることが分かる. 平織膜では膜厚 t が PET 膜に比べて大きいことを踏まえて面内剛性と折り目剛性の式(16), (17)をみると, 面内剛性については膜幅 b が, 折り目剛性については折り目の曲率半径 r の影響が強いと考えられる. これらは, 繊維密度や折り目がつきづらいことに由来している.

Table 7: Woven / PET membrane ratio of each experimental and theoretical mechanical properties

	Woven /PET membrane ratio
Maximum of resistance torque on later deployment	0.457
Linear model on tangent stiffness	0.283
Bending stiffness	8.1
Tensile stiffness	0.20
Crease stiffness	0.39

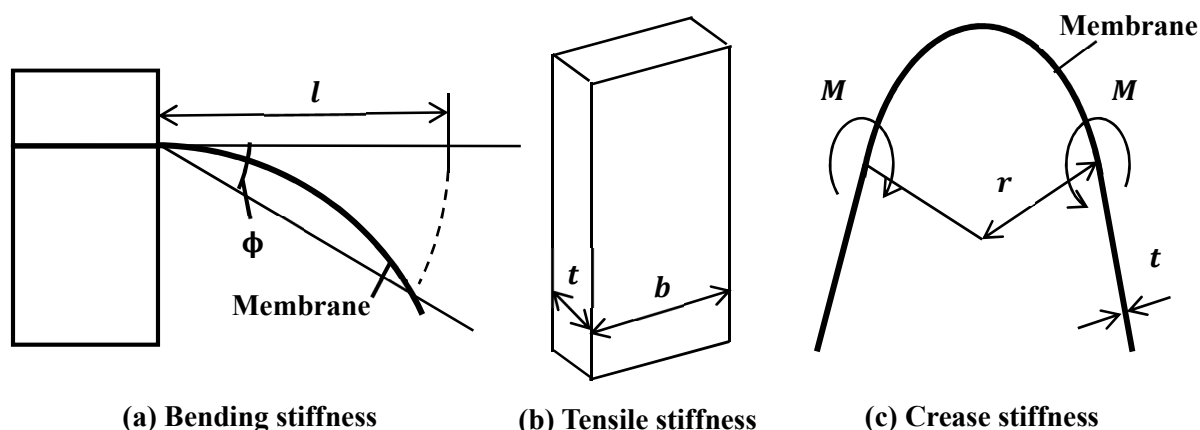


Figure 24: Analysis model of mechanical properties

5. 結論

本研究では、展開過程におけるブーム膜複合構造の力学解析モデルを構築し、準静的に計測したブーム膜複合構造が有する展開トルクを角度歴で評価する手法を確立した。そして、実験により得られた円筒 CFRP ブームとブーム膜複合構造が有する展開トルクの差分から、ブーム膜複合構造に取り付けられた展開膜の展開抵抗を定量的に明らかにした。算出した PET 膜と平織膜の展開抵抗の比較から、平織膜の展開抵抗は PET 膜の 30~50%程度であることを示した。加えてそれぞれの機械特性を評価するモデルをもとに検討を行ったところ、OrimigamiSat-1 に搭載したモデルでは、展開抵抗に関して面内剛性や折り目剛性が有意であり、平織膜が展開しやすい物理的な要因として、折り目がつきづらいことやみかけよりも断面積が少ないことが考えられる。

謝辞

本研究は、OrimigamiSat-1 プロジェクトメンバー、サカセ・アドテック株式会社および IKAROS 構造専門部会の皆様のご協力をいただいた。

参考文献

- 1) Hiraku Sakamoto, Hiroshi Furuya and Yasutaka Satou, M.C. Natori, Akihito Watanabe, Nobuyoshi Kawabata, and Ryoji Sakai, Nobukatsu Okuizumi, Osamu Mori, Yoji Shirasawa, and Moto Takai, Nobuhisa Katsumata, Ayako Torisaska, Ryu Funase, Origami-Based Membrane Storage and Deployment Technology for De-Orbiting Satellites, 64th Int. Astronautical Congress, Beijing, IAC-13-B4.6A.4, pp.1-10, Sept. 23-27, 2013.
- 2) Hiroshi Furuya, Yasutaka Satou, Hiraku Sakamoto, M.C. Natori, Nobukatsu Okuizumi, DEPLOYMENT DYNAMICS OF MEMBRANE-BOOM WRAPPED STRUCTURES, 65th International Astronautical Congress, Toronto, Canada, IAC-14-C2.3.10, pp.1-6.
- 3) 博田真矢, 生田寛幸, 奥泉信克, 名取通弘, 渡邊秋人, 山川宏, A11 組紐被覆 Bi-Convex ブームによる膜面構造物の展開, A11, 第 30 回宇宙構造・材料シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原, Dec. 1, 2014, pp.1-5.
- 4) Hiroki NAKANISHI, Hiraku SAKAMOTO, Hiroshi FURUYA, Masahiko YAMAZAKI, Yasuyuki MIYAZAKI, Akihito WATANABE, Kazuki WATANABE, Ayako TORISAKA-KAYABA, and Mitsushige ODA, Development of Nano-Satellite OrigamiSat-1 with Highly Functional Deployable Membrane, The 4th International Symposium of Solar Sail, 17085, Kyoto Japan, Jan.17-20, 2017, pp1-4.
- 5) Hiroshi Furuya, Kyohei Yashima, Takashi Yokomatsu, Hiraku Sakamoto and Akihito Watanabe, Micro-gravity Testing of Boom-Membrane Integrated Deployable Structures for Micro-satellites, AIAA-2017-0618, AIAA SciTech2017, Grapevine, TX, pp.1-5, Jan.9-14, 2017.
- 6) Takaomi Chubachi, Hiroshi Furuya, Hiraku Sakamoto, Undesired Equilibrium Configurations of Boom-Membrane Integrated Structure during Deploying Motion, AIAA-2018-0695, AIAA SciTech2018, Kissimmee, Florida, Jan. 8-12, 2018, pp.1-21.
- 7) 日本繊維機械学会基礎繊維工学編集委員会 (編), 基礎繊維工学 3 布の構造と性質, 1967, 日本繊維機械学会, pp. 53-55.
- 8) 吉識雅夫 (著), 金沢武 (著), 材料力学明解, 養賢堂 (1959/04), pp. 195-205.