

## A04 微小重力環境試験におけるブーム・膜複合展開構造の展開力特性

八島 京平 (東工大・院), 古谷 寛 (東工大)

Kyohei Yashima (Tokyo Institute of Technology)

Hiroshi Furuya (Tokyo Institute of Technology)

### 1 序論

現在、3U-CubeSat"ORIGAMI-Sat1"はミッションの1つとして軌道上での膜構造の展開・展張特性の計測を計画しており、機能モデルを用いて収納性・展開特性について試験・検討が行われている[1]。"ORIGAMI-Sat1"の膜面展開ミッションで用いられるブーム・膜複合展開構造は押しつぶすことで収納可能かつ単体で自己伸展可能な円筒 CFRP ブームと薄膜を合わせた構造になっている。このブーム・膜複合展開構造が重力下で展開する場合、円筒 CFRP ブームの断面が押しつぶされた状態から円形に復元する前は剛性が低いため、展開終盤に自重によって横倒れ座屈を生じ完全展開することができない場合がある。そのため、展開初期のトルク特性は取得できたものの、展開終盤のトルク特性が測定できなかった。そこで、展開過程全体のトルク特性を計測するため、円筒 CFRP ブームが横倒れ座屈することなく完全展開できる重力補償装置として吊り下げ式重力補償装置を提案し、展開過程におけるトルク特性を定量的に明らかにした[2]。しかし、地上展開試験におけるブーム・膜複合展開構造の展開特性が吊り下げ式重力補償装置から受ける影響は明らかになっていない。

そこで本研究では微小重力環境においてブーム・膜複合展開構造の展開実験を行い、微小重力環境下における展開特性を取得し、地上展開試験と微小重力環境試験の結果を比較することで吊り下げ式重力補償装置の妥当性を明らかにすることを目的とする。

### 2 展開実験

本研究の目的は地上展開試験と微小重力環境試験の比較による吊り下げ式重力補償装置の妥当性評価であるため、微小重力環境が必要とされる。そこで航空機を用いて作成される微小重力環境において展開実験を行う。

#### 2.1 微小重力環境試験

微小重力環境試験はダイヤモンドエアサービス社が提供する  $\mu\text{G}$  実験を利用した。 $\mu\text{G}$  実験は航空機が放物線飛行を行うことにより、機内に 20 秒間の微小重力環境( $3.0 \times 10^{-2}[\text{G}]$ )を作り、各種の宇宙実験などを行う実験である。実験には JAXA が開発した実験支援システムを搭載している。この実験では実験機器を実験用共通ラックに固定し、実験者は椅子に座った状態で実験を行う[3]。

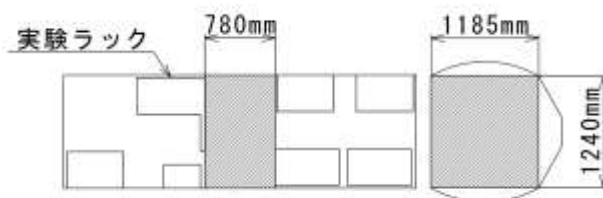


図 1: 航空機内配置

図 1 は微小重力環境試験を行う航空機内の配置である。ブーム・膜複合展開構造の展開は赤矢印の位置を中心として行う。機内の配置の点から展開実験が行えるブーム長は対角 1.0m 程度であることが分かる。このことから微小重力環境試験で展開するブーム・膜複合展開構造の大きさは最大対角 1.0m とし、それに合わせて膜や疑似デバイスの設計を行う。

#### 2.2 円筒 CFRP ブーム

本研究では自己伸展可能なブームとして円筒 CFRP ブームを用いる。このブームは半円状 CFRP ブームを樹脂で接合し円筒状にしたものである。樹脂部分を曲げ、ブームを押しつぶすことで巻きつけ・折りたたみが可能となる。本研究で用いる円筒 CFRP ブームは直径 13[mm]、長さ 500[mm]である。



図 2: 円筒 CFRP ブーム

#### 2.3 展開膜

ブーム・膜複合展開構造ではアルミ蒸着 PET 膜厚み 25[ $\mu\text{m}$ ]を用いる。膜の折幅は 70[mm]で設計した。膜質量は 20.3[g]である。折りたたみがより容易になるよう折り目数を減らすため Skew fold[4]を用いた。図 5 では赤線が谷折、黒線が山折である。

膜状には疑似デバイスとしてポリイミド膜で製作した疑似デバイスを貼り付けた。

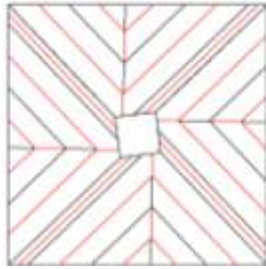


図 3：膜折パターン

#### 2.4 巻きつけ収納ハブ

円筒 CFRP ブームおよび展開膜は巻きつけ収納ハブに収納する。ブームはボルトを用いてハブ中心に固定されており、ブームをハブに巻きつけた際の曲率半径は 10[mm]から 25[mm]程度である。

展開特性を計測する 6 軸力覚センサは巻きつけ収納ハブの下に固定されており、サンプリングレート 1000[Hz]で展開トルクを計測する。



図 4：巻きつけ収納ハブ 収納状態



図 5：巻きつけ収納ハブ 展開状態

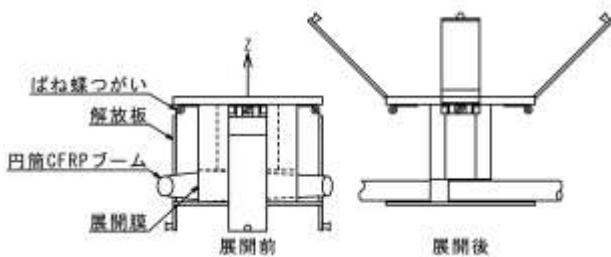


図 6：収納状態 概要図

#### 2.5 6 軸力覚センサ

実験はハブを固定して行い、展開特性として各軸の展開時トルクおよび力を計測する。これらの計測はサンプリングレート 1000[Hz]で行った。定格容量は荷重各軸±50[N]、トルク各軸±1[Nm]であり、分解能は±1/4000 である。

#### 2.6 地上展開実験

地上展開実験では参考文献[2]で提案された、ケーブルによってブーム先端の支持を行う吊り下げ式重

力補償装置を用いる。

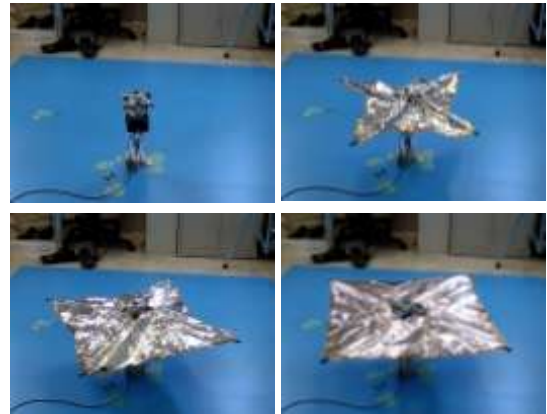


図 7：展開過程

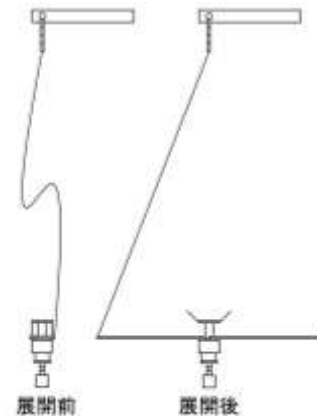


図 8：吊り下げ式重力補償装置 概要図

### 3 実験手順

地上展開実験および微小重力環境試験は以下の手順で行った。

- 巻きつけ収納ハブへブームおよび膜の巻きつけを行う。ブーム・膜複合展開構造は解放板のネジにテグスをかけることで固定されている。
- 実験ラックに 6 軸力覚センサおよび巻きつけハブを取り付ける。
- 固定しているテグスをニクロム線で溶断する。これによって展開が開始される。
- 取得したアナログデータから展開が行われている部分を抽出し、展開が行われていない時間のデータから基準値を算出する。その基準値を展開時間のトルクデータから減算することでトルク時刻歴を抽出する。

実験に用いたモデルは以下の 3 種類である。

表 1：実験設定

モデル名	膜	擬似デバイス
ブームモデル	なし	なし
膜モデル	あり	なし
デバイスモデル	あり	あり

ブームモデルは円筒 CFRP ブームのみの展開を行うモデルであり、ブームの形状復元による展開力の測定やブーム展開挙動の計測を行う。

デバイスモデルは膜の単位質量が増加した際の挙動変化や実際の利用に即した展開挙動の計測に用いる。

#### 4 ブーム・膜複合展開構造の展開力特性

本章では微小重力環境試験で取得したトルクおよびZ軸方向荷重の時刻歴データを説明したのち、展開開始・完了時刻、展開初期の振動原因の特定、各モデルの展開特性の詳細な考察を行う。

##### 4.1 微小重力環境試験結果の概要

航空機実験を用いた微小重力環境試験における展開トルク時刻歴およびZ軸方向荷重を図9~11に示す。

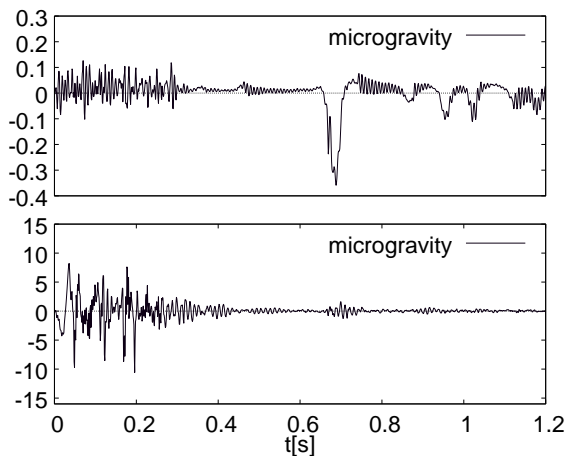


図9：ブームモデル トルク時刻歴

図9はブームモデルの取得データであるトルクおよびZ軸方向荷重時刻歴を示している。横軸は展開開始時刻からの経過時間である。この図に示す展開実験ではブームモデルが完全に展開した。

ブームモデルのトルク時刻歴において、展開開始から約0.3[s]まで±約0.1[Nm]の振動が生じている。0.3[s]以降では振幅の小さな振動が認められる。微小重力環境試験の展開過程を撮影した動画から、展開完了時間は0.68[s]である。展開完了時にはトルクが-0.4[Nm]近くまで変化する。展開過程を撮影した動画から、ブームが直線状に復元したのちオーバーシュートを起こし、ブームの運動により振動が発生すると確認した。

同図に示すZ軸方向荷重時刻歴では、展開開始から0.3[s]までに±約10[N]の振動が生じている。0.3[s]以降は小さな振動が表れており、展開完了直後に振動が起きている。

図10は膜モデルにおけるトルクおよびZ軸方向荷重時刻歴を示したものである。この図における微小重力環境試験では、膜モデルは完全に展開できなかった。

膜モデルの展開トルク時刻歴において、ブームモデルと同様に0.3[s]まで大きな振動が生じている。ただし、ブームモデルよりも明瞭に周期的にピークが生じており、ピークが表れる時刻はおおよそ0.05, 0.

12, 0.18, 0.21 [s]である。0.3[s]からは小さな振動が表れている。展開完了時間は、展開動画より、1.25, 1.19[s]である。展開完了後のブーム膜運動による振動が認められたものの、ブームモデルよりも小さい振幅である。

Z軸方向荷重について、展開開始時刻から0.05[s]ごろに大きなピークが表れており、約0.3[s]まで振動が続いている。

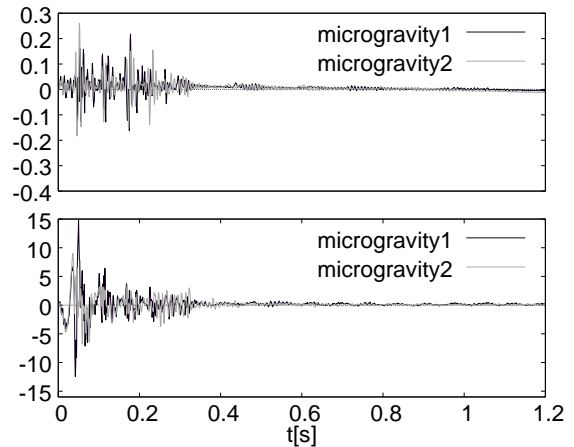


図10：膜モデル トルク時刻歴

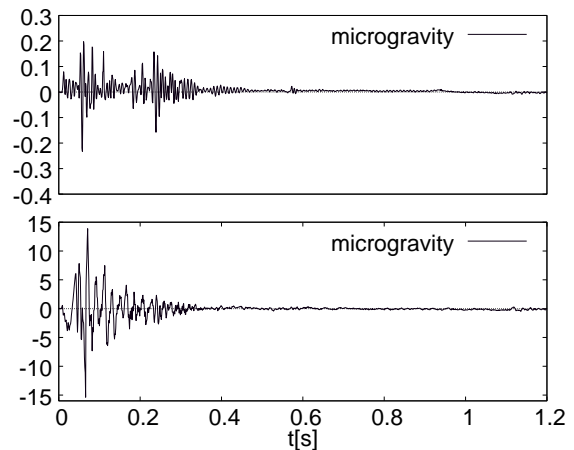


図11：デバイスモデル トルク時刻歴

図11はデバイスモデルのトルクおよびZ軸方向荷重の時刻歴を示している。この図に示す微小重力環境試験において、デバイスモデルは完全展開できなかった。

トルク時刻歴では、図9, 10で示したトルク時刻歴と同様に、展開開始時刻から0.3[s]において振動が起きており、2つの大きなピークが表れている。振動は約0.3[s]まで続き、その後は展開し時刻から0.3[s]までの振動と比べて小さな振動となっている。微小重力環境試験の動画より、展開完了時間は1.395[s]であり、展開完了後にはブームの運動による振動が見られたものの、振幅はブームモデルよりも小さく、膜モデルよりも大きい値である。

デバイスモデルのZ軸方向荷重では、展開開始後0.07[s]程度で最大の振幅が表れ、約0.3[s]まで減少することが認められた。



微小重力環境における各モデルの実験結果より、展開過程は展開開始から 0.3[s]、0.3[s]から展開完了、展開完了以降の3つに大別できることが明らかになった。

#### 4.2 展開開始と展開完了時間

微小重力環境試験と地上試験のトルクおよびZ軸方向荷重時刻歴を比較するため、展開開始時刻および展開完了時刻を考察する。

##### 展開開始時間

微小重力環境試験および地上試験における展開開始時間近傍のトルク時刻歴を図 12,13 に示す。

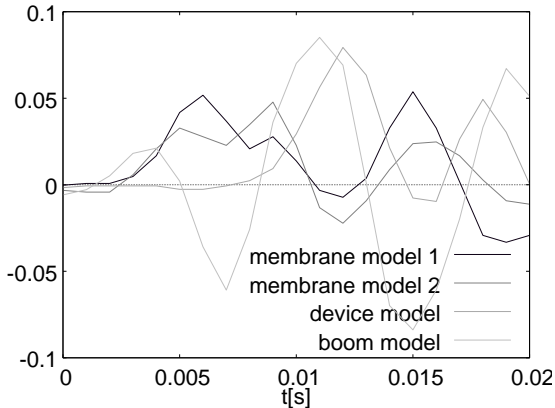


図 12：微小重力環境試験 展開開始時間

図 12 は微小重力環境試験における各モデルの展開開始近傍 0.02[s]を示したものであり、解放板のテグス溶断開始時間を 0[s]としている。微小重力環境試験において、テグス溶断の開始時間をデータとして取得している。図 12 より、テグス溶断の開始からトルクが立ち上がるまでの時間はおよそ 0.002[s]程度と十分短いため、データから判断される溶断開始時間を展開開始時間とする。

地上試験における展開開始時間近傍を図 13 に示す。図 13 において、展開開始時間とした時刻を 0[s]としている。図 13 より、地上展開試験において、展開開始を表すトルク増加以前の最大値が 0.002[Nm]であるため、トルクが 0.002[Nm]より大きくなった時刻を展開開始時間とする。

以上より、微小重力環境試験では取得データから、地上試験ではトルクがしきい値 0.002[Nm]を超えた場合を展開開始とする。

##### 展開完了時間

ブーム膜複合展開構造ではブームが直線状に復元した点を展開完了としている。この状態は、巻きつけ収納ハブが剛体であると仮定すると、トルクが 0 になる時刻と考えられる。展開完了時間の考察を行う。

微小重力環境試験および地上試験における展開完了時間近傍を図 14~17 に示す。

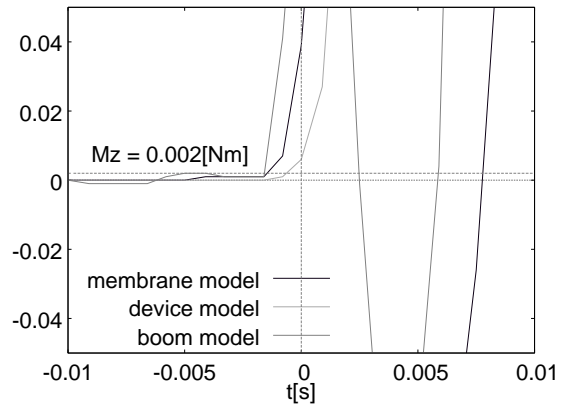


図 13：地上展開試験 展開開始時間

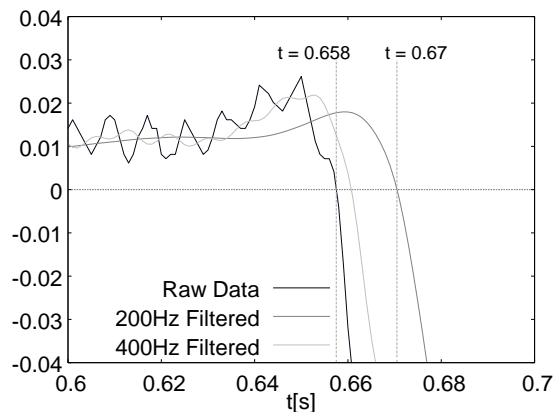


図 14：展開完了時間 ブームモデル

展開完了をトルクが 0 になる時刻と考えた場合、データからの判断が必要である。しかし、各モデルのトルクデータは振動成分が多く、トルクが 0 となる時刻を判断しにくい。そこで展開完了時間の判断について予備的な検討を行った。

図 14 は微小重力環境試験において、ブームモデルのトルク値が 0 になる時刻近傍のトルク時刻歴および 200,400[Hz]の 5 次のローパスバタワースフィルタ処理を施したトルク時刻歴を示したものである。同図より、展開完了以前は取得データに振動成分が多く含まれており、400[Hz]のフィルタ処理では振動成分が十分に除去できていない。そこで、振動成分を十分に除去できるフィルタとして 200[Hz]を用いることとした。フィルタ処理を施したデータでは 0.67[s]であり、撮影動画から確認した展開時間に対する割合は 98.5%である。

微小重力環境試験における膜モデルのトルク値が 0 になる時刻近傍を図 15,16 に示す。

図 15,16 から、展開完了時刻はそれぞれ 1.084,0.913[s]である。これは動画で確認した展開完了時間の 85.8,72.3%である。

図 17 はデバイスモデルの微小重力環境試験において、トルク値が 0 になる時刻近傍を示したものである。フィルタ処理を施したデータより、トルク値が 0 になる時刻は 0.993[s]である。これは撮影動画で確認した展開完了時間 1.395[s]の 71.2%である。

以上より、定量的な判断のため 200[Hz]の 5 次バ

タワースローパスフィルタで処理を施したトルク値が0になる時刻を展開完了時刻とした。

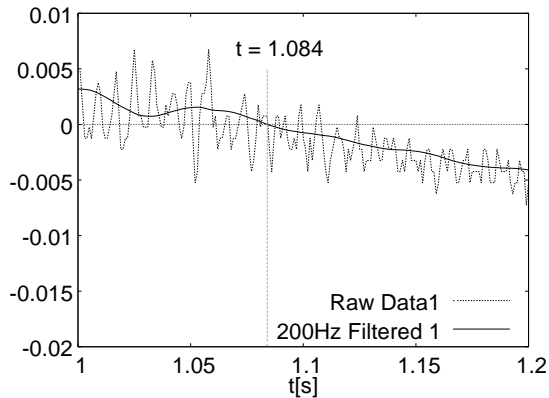


図 15 : 展開完了時間 膜モデル 1

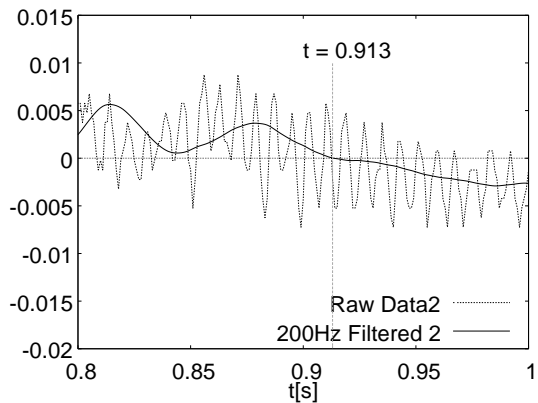


図 16 : 展開完了時間 膜モデル 2

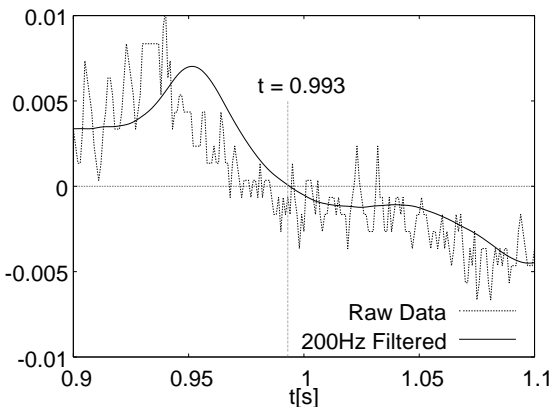


図 17 : 展開完了時間 デバイスモデル

#### 4.3 微小重力環境試験における展開特性

航空機を用いた微小重力環境試験におけるブーム・膜複合展開構造の展開特性を図 18~24 に示し、各モデルについて展開過程の詳細な考察および展開開始から 0.3[s]までの振動について考察を行う。実験において、膜およびデバイスモデルの展開実験で完全展開できなかった。そのため、前述した展開完了時間を仮想的に展開完了時間としている。

##### (1) ブームのみモデル

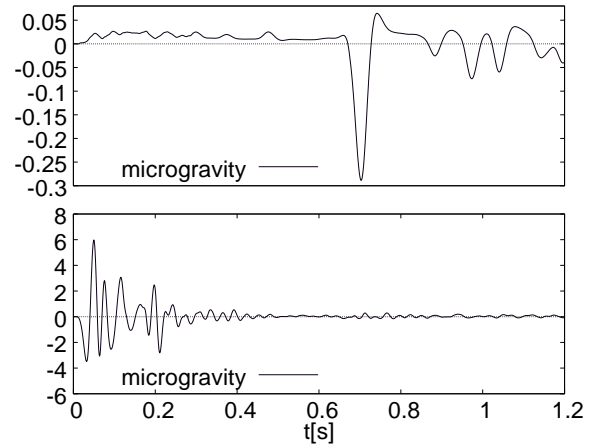


図 18 : ブームモデル トルク・Z 軸方向荷重時刻歴

図 18 は微小重力環境試験におけるブームモデルのトルクおよび Z 軸方向荷重時刻歴である。データは 200[Hz]の 5 次バターズローパスフィルタで処理を行った。図 22,24 も同様の処理を行う。

図 9 より、ブームモデルの展開過程において、展開開始から 0.3[s]にかけて振動が生じている。この振動は 0.12[Nm]を中心に 0.4[Nm]程度の振幅を持っており、およそ 0.06[ms]間隔でピークが表れる。展開完了時刻は 0.67[s]である。展開完了後にはブームのオーバーシュートによる振動が発生している。ブームモデルにおいて、ブーム同士は膜による拘束がない。そのため、ブームの運動が同期せず、振動の概形が合成波ようになる。

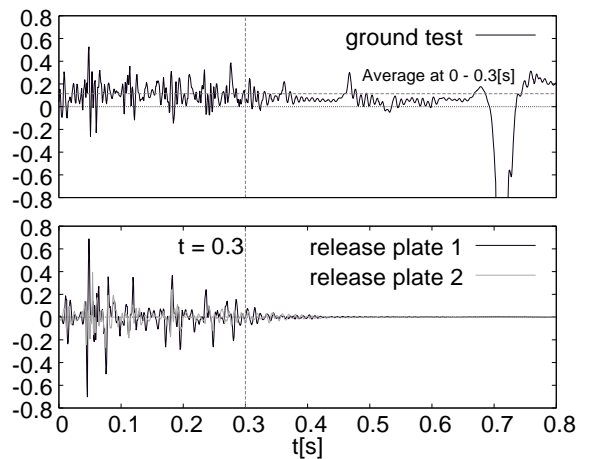


図 19 : 解放板展開 トルク時刻歴 比較

図 19 は巻き付け収納ハブの解放板のみの動作とブームモデルのトルク時刻歴の比較を示したものである。図 19 から、解放板の動作によって最大 0.7[Nm]の瞬間的なトルクが生じている。これに対して、ブームモデルの地上試験結果から、振動はおおよそ展開開始から 0.3[s]までの平均値を中心に振幅が 0.3[Nm]である。このことから、時刻歴データの展開開始から 0.3[s]までのトルクは解放板の動作によるものが支配的である。よって、以降では 0.3[s]から

展開完了のトルク時刻歴について議論を行うものとする。

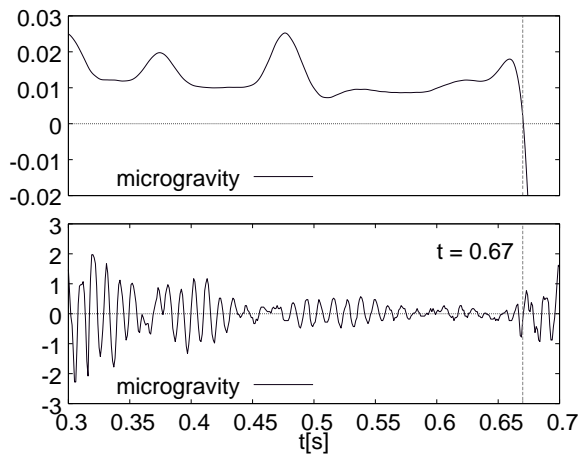


図 20：ブームモデル トルク・Z 軸方向荷重時刻歴 2

図 20 より、トルク時刻歴が展開完了前においてピークを持つことが分かる。これはブームの断面形状が変化する際にトルクにピークが起こると考える。くわえて、トルクにピークが表れる時刻において Z 軸方向荷重の振動が減少する。地上試験においてお同様の傾向が認められた。これは、ブームの断面形状変化によって剛性が上昇し、振動が抑制されるためと推測する。

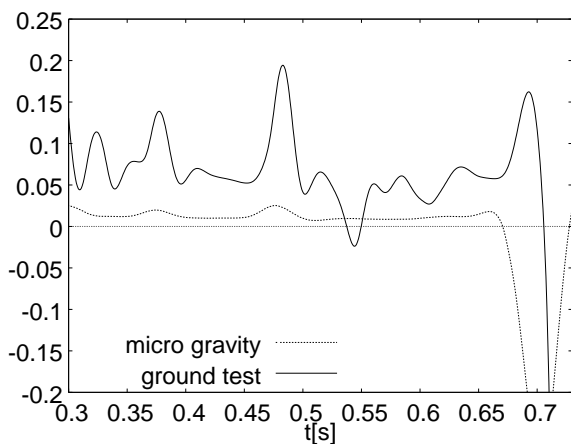


図 21：ブームモデル 地上試験との比較

表 2：ブームモデル ピーク値 比較

試験	時刻 [s]	ピーク値 [Nm]	地上試験に対する割合 [%]
地上試験	0.378	0.139	-
	0.483	0.194	-
微小重力環境試験	0.374	0.0198	14.2
	0.476	0.0252	13.0

図 21 はブームモデルにおける微小重力環境試験および地上試験の比較である。0.3[s]から展開完了まで、微小重力環境試験と地上試験ともにトルクはほ

ぼ一定である。地上展開試験結果について、展開完了時刻に考察と同様にトルク時刻歴が  $Mz = 0$  と 1 点で交わるように、60[Hz]の 5 次バターワースローパスフィルタで処理を行った。

表 2 はブームモデルの微小重力環境試験および地上試験のピークが生じている時刻、ピーク値、ピーク値と 0.3[s]から展開完了までのトルク平均値との割合をまとめたものである。

表 2 より、ブームの断面形状変化によるトルクのピークは地上試験においても確認でき、発生する時刻も微小重力環境試験結果とほぼ同じである。地上試験に対して、微小重力環境試験のピーク値と平均値の割合が小さい傾向にある。ピーク値は地上試験の 14%程度になっている。これは試験前の長期にわたる収納状態での保管が影響しており、長期収納によるトルク低下により膜・デバイス両モデルにおいて不完全展開を引き起こしたと考える。

以上より、展開開始から 0.3[s]までの時刻歴データは解放板の動作による振動が支配的であることが明らかになった。くわえて、ブームモデルにおいて、ブームの断面形状変化に合わせてトルクにピークが生じ、ピークが生じると Z 軸方向荷重時刻歴にあらわれる振動が抑制されることが認められた。ピークが生じる時刻は重力環境に寄らずほぼ一定であり、ピーク値は地上試験の 14%程度になることが示された。

## (2) 膜モデル

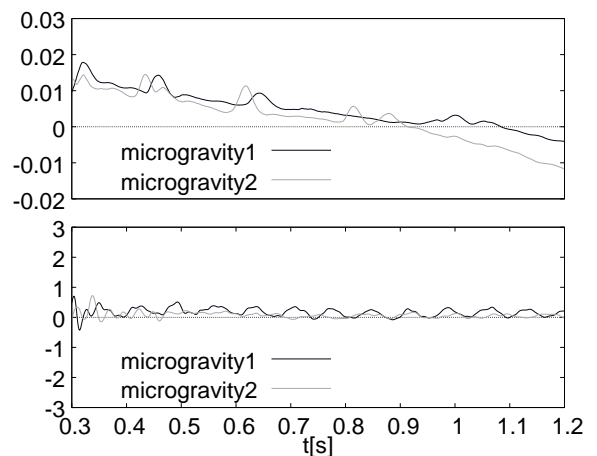


図 22：膜モデル トルク・Z 軸方向荷重時刻歴

図 22 は微小重力環境試験における膜モデルのトルク時刻歴であり、展開時間はおよそ 1.0[s]である。展開完了までにブームの断面形状変化によるトルクの変化が現れており、展開が進むにつれてトルクが緩やかに減少している。Z 軸方向荷重では 0.4[s]以降に 10[Hz]程度の振動が生じている。ブームモデルではトルクにピークが表れる時刻で Z 軸方向荷重の振動が減少していた、しかし膜モデルでは振動は減少せず、振幅がブームモデルよりも小さい。

図 23 は膜モデルの微小重力環境試験および地上試験のトルク時刻歴である。双方の時刻歴において

ブーム断面形状の変化によるピークが確認できるものの、ピークが生じる時刻に差が生じている。

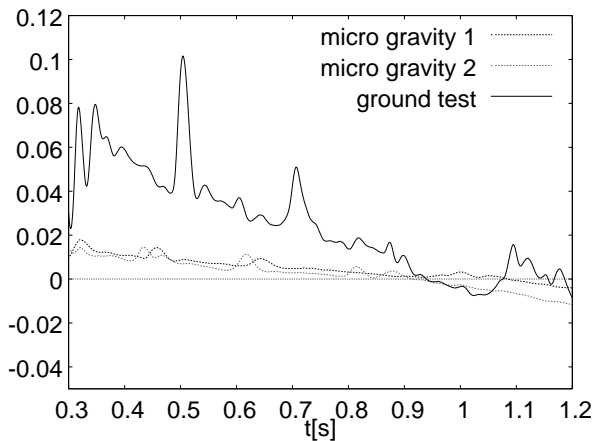


図 23：トルク時刻歴 地上試験との比較

表 3：膜モデル ピーク値 比較

試験	時刻 [s]	ピーク値 [Nm]	地上試験に対する割合 [%]
地上試験	0.504	0.102	-
	0.707	0.051	-
微小重力	0.458	0.0143	14.0
環境試験 1	0.643	0.0093	18.2
微小重力	0.434	0.0145	14.2
環境試験 2	0.618	0.0113	22.2

表 3 より、展開完了時間はほぼ同じであるものの、ピークが生じる時間は 10%程度の差が生じている。ピーク値と平均値の割合はブームモデルとほぼ同じ傾向である。絶対値もブームモデルと同様に地上試験の 14%程度になっている。ただし、2 つ目のピークについてはブームモデルとは異なり、20%程度となっている。

以上より、膜モデルにおいて、ピーク発生時刻は地上試験に比べて約 10%早くなり、ピーク値はブームモデルと同様に地上試験の 14%程度となることが示された。トルク時刻歴において、ピークの発生による Z 軸方向荷重に生じる振動の減少は確認されなかった。

### (3) デバイスモデル

図 24 は微小重力環境試験におけるデバイスモデルのトルク時刻歴であり、展開時間は 0.99[s]である。展開完了までにピークは一か所のみ確認できる。展開開始から 0.3[s]までの時間と 0.3[s]から展開完了までのトルクはそれぞれほぼ一定である。ピークの位置はブームモデル・膜モデルがほぼ同様の場所に位置していたのに対して、デバイスモデルでは展開完了直前のみとなっている。また、トルク時刻歴にピークが生じる時刻の Z 軸方向荷重に生じる振動の減少も確認できない。Z 軸方向荷重時刻歴において、展開開始から 0.3[s]までブームモデル・膜モデルよりも 20%以上小さな値となっている。

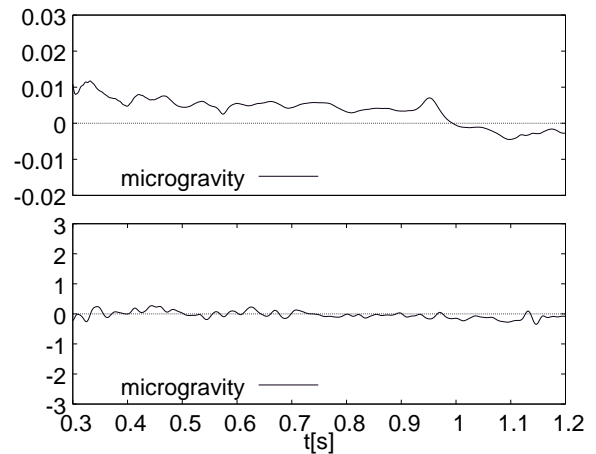


図 24：デバイスモデル トルク・Z 軸方向荷重時刻歴

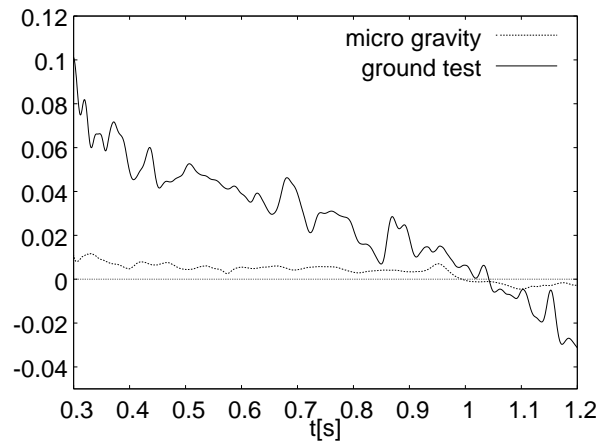


図 25：トルク時刻歴 地上試験との比較

図 25 より、地上試験との比較では、展開時間の差はほとんどない。膜モデルと同様に、トルク時刻歴において、微小重力環境試験が地上試験よりも小さくなっている。ただし、膜モデルでは微小重力環境試験と地上試験ともにトルクが減少していたものの、デバイスモデルでは地上試験のみが減少している。

以上より、デバイスモデルにおいて、ピークが 1 つ確認できた。ピークの発生による Z 軸方向荷重に生じる振動の減少は膜モデルと同様に確認できない。

## 9. 結論

航空機を用いた微小重力環境試験を行い、ブーム膜複合展開構造の展開特性計測を行い、微小重力環境におけるブーム膜複合展開構造のトルク時刻歴および Z 軸方向荷重時刻歴を定量的に明らかにし、地上試験との比較を行った。

この結果、ブームモデルと膜モデルにおいて、ブーム断面形状変化によるピークが生じる時刻が地上試験と微小重力環境試験で変わらず、微小重力環境試験のピーク値が地上試験のおよそ 14%になることが明らかになった。ブームモデルにおいてトルクにピークが生じた時、Z 軸方向荷重に生じる振動が

減少し、膜モデル・デバイスモデルで減少しなかったことから、膜モデル・デバイスモデルの展開完了後の振動は膜の運動によるものと示唆された。

#### 参考文献

- [1] 「ORIGAMI PROJECT」, Origami-Sat1 のミッションステートメント, <<http://www.origami.titech.ac.jp/archives/81>>
- [2] 八島京平ほか,超小型衛星用ブーム膜複合展開構造の地上展開実験特性,第 31 回宇宙構造・材料シンポジウム,相模原,pp.1-5,2015 年 12 月 9 日
- [3]ダイヤモンドエアサービス株式会社,「 $\mu$ G 実験」,<<http://www.das.co.jp/service/operation/gravity/index.html>>
- [4] Hiroshi Furuya and Tadashi Masuoka: Concept of Rotationally Skew Fold Membrane for Spinning Solar Sail, CD-ROM Proc. 55<sup>th</sup> International Astronautical Congress, IAC-04-I.1.05, Vancouver, pp.1-5, Oct.4-8, 2004.