

B4 複合材円筒ブーム構造の航空機実験における展開挙動の数値解析

天本十和 (東工大・院), 坂本啓 (東工大), 古谷寛 (東工大), 奥泉信克 (JAXA),
渡辺秋人 (サカセ・アドテック), 川端信行 (サカセ・アドテック)

Towa Amamoto (Tokyo Institute of Technology), Hiraku Sakamoto (Tokyo Institute of Technology),
Hiroshi Furuya (Tokyo Institute of Technology), Nobukatsu Okuizumi (JAXA),
Akihito Watanabe (Sakase Adtech), Nobuyuki Kawabata (Sakase Adtech)

1. 序論

現在, 宇宙展開膜構造が注目を集めている[1]. これは, 従来の展開構造と比べて軽量かつ, 高収納性という利点を持つためである. この構造の3軸安定衛星にも用いられる設計例として図2に示すブーム・膜複合構造というものが提案されており, 実現が目指されている[2]. これは, CFRPの円筒形状の展開ブームと薄膜からなる構造である. 展開ブームは薄膜の展張形状を保持する役割を果たす.

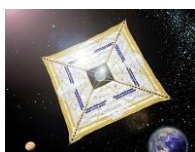


図1 IKAROS (©JAXA)

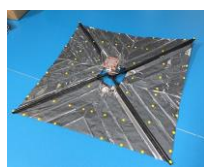


図2 ブーム・膜複合構造

この展開ブームの特徴として, 図3のように収納時には円筒を薄くつぶし, 巻きつけ収納が可能であること, 展開時にはその復元力により自己展開を行えることが挙げられる.



(a) 収納時

(b) 展開時

図3 展開ブームの収納と展開

この構造の宇宙実証を行うために, 軌道上での展開挙動推定が必要である. これは, 軌道上での実証段階の前に, 展開確実性を保証できるようになるためである. そこで, IKAROSで行われたように, 地上実験からデータを取得し, 数値解析を行うことにより展開挙動を推定することを目指している.

しかし, 地上での展開実験は, ブーム・膜の展開挙動が重力・大気の影響を受けやすいといった問題がある. 例えば, 収納状態では断面がつぶれており剛性が低いため, 図4のように重力に引かれて根元が横倒れ座屈しやすいという現象が確認されている. また, 膜は展開ブームよりも剛性が低く, より顕著に形状を維持できない. よって, 地上実験での展開挙動推定は困難となっている.



図4 展開ブームへの重力の影響

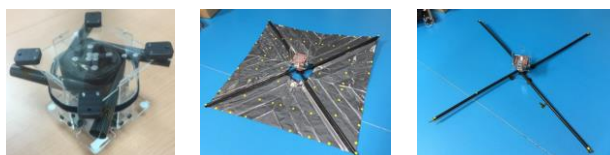
そこで本研究では, 微小重力実験結果を用いて数値解析モデルを構築し, 限定的な地上実験により軌道上での展開挙動を推定する手法を確立することを目指す. また, 展開挙動推定の第一歩として, 展開ブームのみの挙動に注目することとする. この推定法ではまず, 限定的な地上実験により, 展開挙動の

数値解析に必要なパラメータの同定を行う。次に、軌道上条件下での数値解析を行う。これは、数値解析上で重力・空気といった影響を取り除くことで実現できる。これにより、軌道上での展開確実性を保証した状態で宇宙実証を実施することができる。この展開挙動推定法は、第2章の数値解析モデルの構築、第4章の航空機実験との比較による妥当性の評価、第5章の限定的な地上実験でのパラメータ同定方法の検証をそれぞれ達成することで確立できる。

2. 数値解析モデルの構築

2. 1. 対角配置型展開ブーム構造

本研究の対象として、図5に示すブーム・膜複合構造から膜を取り外したものを扱った。展開ブームは、表1に示すものを用いた。



(a) 収納時 (b) 展開時 (c) ブームのみ

図5 展開ブーム構造

表1 展開ブームのパラメータ

材質	CFRP
形状	円筒
質量[kg]	13×10^{-3}
長さ[mm]	5.0×10^2
直径[mm]	13
厚さ[mm]	5.0×10^{-1}

2. 2. 多粒子法による展開ブームの表現

本研究では、展開ブームのモデル化に多粒子法という手法を用いた[3]。これは、対象物をばね質点系でモデル化するというものである。

2. 3. 数値解析モデルの構築

展開ブーム構造のモデルの構築には、初期形状、展開中の形状、根元固定部での振動の4つの模擬を統合することで行った。

まず、収納形状の作成を行った。展開ブームは、展開機構のハブにぐるぐると巻きつけて収納を行っている。そこで、図6に示すように巻きつけ収納した際の折れ曲がり点に節点を配置し、質量、曲げ剛性の設定を行った。なお、今回用いた展開ブームの曲げ剛性は一定値ではないため、3章で考察する。

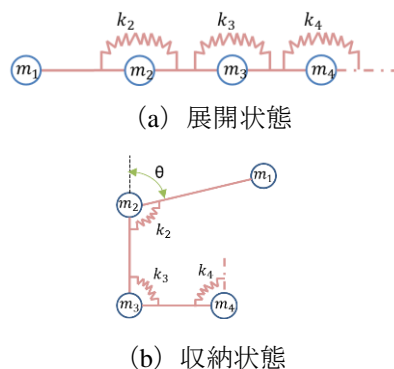
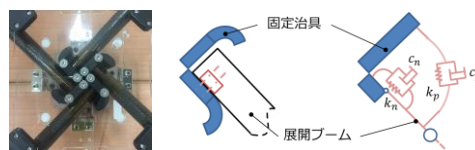


図6 多粒子法によるモデル化

次に、収納状態からの展開の模擬であるが、1)一つの節点が展開を終えてから、次の節点が展開を始める、2)展開が完了した部分は剛体、と2つの条件を仮定した。2)に関しては、展開ブームの円筒形状が保たれた部分のしなりよりも、円筒形状がつぶれた部分の変形が展開挙動の運動を支配していると考えられるためである。

また、展開ブーム根元固定部は、円筒ブームの片面のみを固定していること、展開ブーム4本を凹型に配置していることから、特殊な考慮が必要である。展開後の減衰振動を考慮して、非線形ばねとダンパーを挿入した。また、展開実験を行ったところ、展開ブームの根元が凹型の固定部の固定部に衝突する現象が見られたため、これをペナルティばねとダンパーを考慮することとした。

最後に空気抵抗の模擬は、一様流れ場における円柱にかかる抗力と仮定した。



(a) 根元固定部 (b) ばね-ダンパーモデル

図7 展開ブーム根元固定部のモデル化

以上より、各節点が受ける力は、展開中に置いては、接線方向には展開ブームの曲げ剛性による復元力と空気抵抗、法線方向には慣性力とした。節点が展開中に受ける力を式(1)に、振動中に受ける力を式(2)に示す。また、振動中においては、ペナルティばねを式(3)のように考慮することとした。

$$\vec{F} = \begin{cases} F_\theta = m_i r_i \frac{k_i \theta - \sum_{i=1/2}^n \frac{1}{2} C_{d\rho} \bar{v}_i^2 A_i l_i}{I} \\ F_r = m_i \frac{\bar{v}_i^2}{r_i} \end{cases} \quad (1)$$

$$\vec{F} = \begin{cases} F_\theta = m_i r_i \frac{k_n \theta - c_n \dot{\theta} + k_p \theta - c_p \dot{\theta} - \sum_{i=1/2}^n \frac{1}{2} C_{d\rho} \bar{v}_i^2 A_i l_i}{I} \\ F_r = m_i \frac{\bar{v}_i^2}{r_i} \end{cases} \quad (2)$$

$$k_p = \begin{cases} 0 & (\theta \leq 6.0^\circ) \\ 1.1 \times 10^1 & (6.0^\circ < \theta) \end{cases} \quad (3)$$

3. 静的曲げ試験によるパラメータ同定

2.3節において、展開ブームの曲げ剛性は一定値ではないと述べた。そこで、展開ブームの曲げ特性を導出するために、図8のような静的曲げ試験を行った。この試験は、展開挙動を模擬して折り曲げた状態から開いた状態へ遷移するように行った。

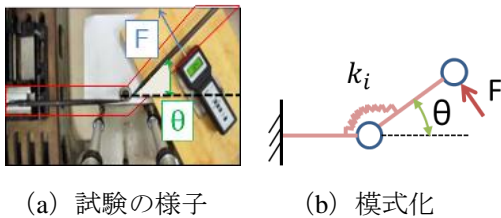


図8 静的曲げ試験

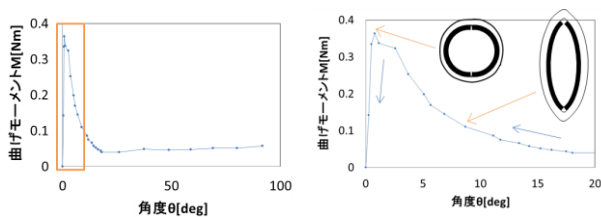


図9 静的曲げ試験結果

結果を図9に示す。折れ曲がり角度が小さい場合には、ブームの復元力である曲げモーメントも小さいことが分かる。また、橙の囲みで示した部分を見

ると、ある角度を下回ると急激に剛性が増加していることが分かる。これは、展開ブームの断面形状が薄くつぶれた状態から、円筒形状へと変化したためと考えられる。ここで得られた結果から、展開ブームの曲げ特性を式(4)として求め、非線形ばねとしてモデル化した。

$$M_i = \begin{cases} 0.08\theta & (\theta < 0.8^\circ) \\ 0.16e^{-0.068\theta} & (0.8^\circ < \theta < 18.5^\circ) \\ 0.0006\theta + 0.129 & (18.5^\circ < \theta) \end{cases} \quad (4)$$

4. 航空機実験によるパラメータ同定と解析評価

4.1. 微小重力下での展開実験

微小重力実験には、航空機実験という手法を用いた。これは、航空機を放物線自由落下運動させて、内部を微小重力状態とする、というものである。この実験は、日本大学宮崎研の主導の下実施された[4][5]。図10に展開実験の様子を示す。展開挙動の計測は、2台のカメラを用いて実験動画の記録と、力覚センサにより展開時に発生するトルクの計測を行った。また、2台のカメラの実験動画から、展開ブーム先端に貼りつけたマーカー位置を3次元計測で算出した。

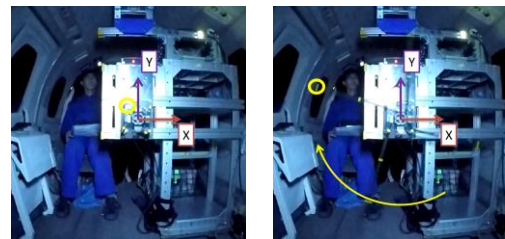


図10 展開実験の様子

4.2. 実験結果

4本の展開ブームがあるうちの1本を取り挙げる。まず、展開ブームが開いていくときの先端の座標を各時刻でプロットしたものを図11に示す。これより、渦状の軌跡を描いていることが分かる。

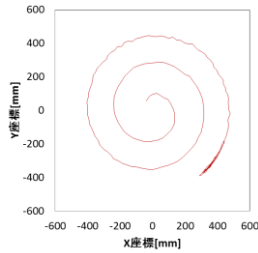


図 11 展開ブーム先端位置

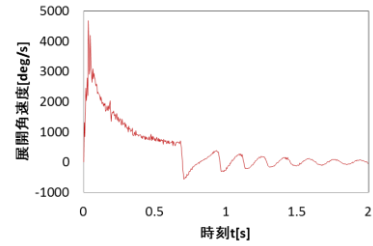


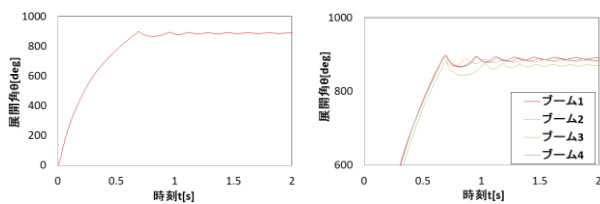
図 14 展開角速度

次に、展開挙動と時刻の関係を見る。展開角を図 12 のように、ハブ中心に対して、ブーム先端が初期位置から現在位置のなす角度と定義する。展開角と時刻の関係を図 13 (a) に示す。また、振動区間に関して、4 本のブームの結果を重ねたものを図 13 の (b) に示す。これより、4 本のブームの展開挙動では、展開完了時刻で最大 0.020[s] の差異があること、振動の周期・振幅の不一致があることが分かった。これは、巻きつけ条件や、ブームの固有振動数がそれぞれ異なるために、4 本のブームが非同期の運動をしているためと考えられる。

最後に、展開角の時刻の差分である展開角速度と時刻の関係を図 14 に示す。これより、展開ブームの展開挙動は、展開中と展開完了後の振動の 2 つであることが分かる。また、振動現象に関して、非対称振動と対称振動に分割できることが分かる。



図 12 展開角の定義



(a) 全区間

(b) 振動区間

図 13 展開角

4. 3. パラメータ同定

4.2 節で考察した現象毎に、展開ブームの数値解析のためのパラメータを同定する。展開中の展開ブームの復元力は、3 章で示した非線形ばねモデルで表す。非対称振動は、展開ブームが固定部に衝突の現象によるものとして、ペナルティばね - ダンパーにより考慮することとする。また、対称振動のデータより、固有振動数、減衰係数を決定する。最後に、空気抵抗の抵抗係数を 0.8 とする。これは、展開ブームを円柱と仮定し、展開ブームの先端速度から求めたレイノルズ数を参考に決定した。

4. 4. ブーム展開挙動解析の評価

作成した数値解析モデルの妥当性を評価するために、解析結果と航空機実験結果との比較を行った。

まず、図 15 に展開ブーム先端の軌跡を示す。ここで、ハブ中心から展開ブーム先端までの長さを展開長さとする、1.6% の精度で一致していることが分かった。これは、3 次元計測による誤差の範囲内に収まる結果となった。

展開角と展開角速度と時刻の関係も同様に比較する。展開角の比較を図 16 に、展開角速度の比較を図 17 に示す。

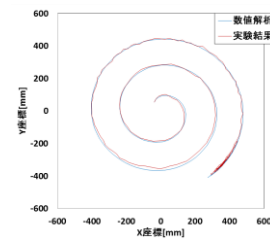
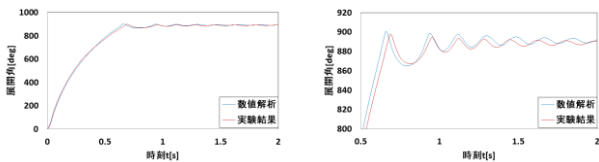


図 15 展開ブーム先端の軌跡の比較



(a) 全区間 (b) 振動区間

図 16 展開角の比較

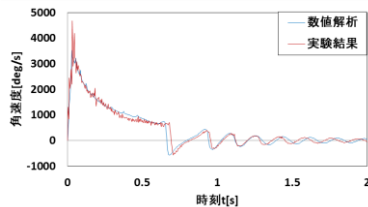


図 17 展開角速度の比較

展開角の比較より、展開完了時刻が 4.5% の精度で一致した。また、振動区間についても定性的に一致しており、振動周期、振幅に大きな差は見られないことが分かる。

以上より、作成した展開ブームの数値解析モデルが妥当であることが確認できたとと言える。

5. 限定的な地上実験を用いた ブーム展開解析の実現

5. 1 展開後の残留振動の推定

本推定法の数値解析モデルは、1) 展開力の模擬、2) 振動の模擬、3) 空気抵抗の模擬の 3 つで構成されている。ここで、展開力は 3 章の静的曲げ試験によって、空気抵抗は 4 章の抵抗係数を 0.8 としたことによって模擬できたとと言える。振動の模擬に関しては、4 章の航空機実験の結果から固有振動数、減衰係数の同定を行った。しかし、この固有振動数と減衰係数のパラメータは限定的な地上実験でも同定できる可能性がある。そこで、この同定を地上実験でも行えるかどうかを検証した。

限定的な地上実験として、展開完了時の振動挙動の計測を行った[6]。対象には、航空機実験と同じ展開ブーム構造を用いた。また、展開ブーム先端が重力で垂れ下がることを抑制するために、図 18 に示すように展開ブーム先端を糸で吊るすという、懸架式

重力補償を用いて展開実験を行った。この実験では力覚センサを用いて、展開後に発生するトルクを計測することで、展開後の振動データの取得とした。

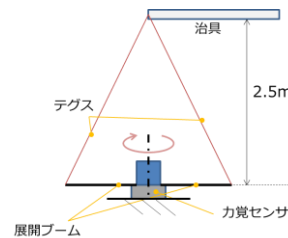


図 18 懸架式重力補償を用いた
地上での展開実験

展開後に派生するトルクを航空機実験と地上実験とで比較したグラフを図 19 に示す。なお、展開完了時刻、ピークの大きさが異なるため、自由振動に移行したと考えられる時刻を 0[s] としている。これより、自由振動の区間において振動周期、減衰が定性的に一致することが分かる。このとき、地上実験での固有振動数・減衰係数の同定は、航空機実験の結果と 12.2% の精度で一致することが分かった。

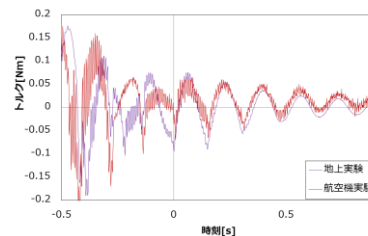


図 19 展開時に発生するトルクの比較

5. 2 真空下での展開挙動の推定

構築した展開挙動推定法を用いて、軌道上での展開挙動の推定を行う。これまでの実験は全て大気圧下であったため、空気抵抗の影響を含めて数値解析を行っていた。そこで、微小重力・大気圧下の条件から、空気抵抗の影響を数値解析上で取り除くことにより、軌道上の展開挙動推定を実現できる。空気抵抗の影響の有無が展開挙動へ与える影響をみるため、展開角の比較を図 20 に、展開角速度の比較を図 21 に示す。

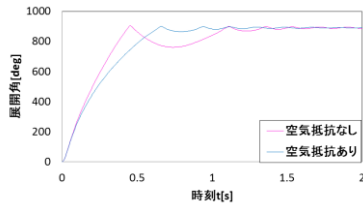


図 20 軌道上の展開角推定

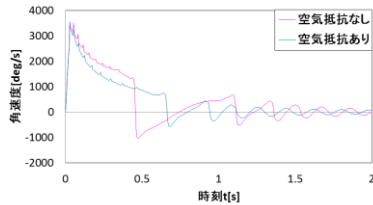


図 21 軌道上の展開角速度推定

本推定法を用いたところ、軌道上では、大気中の展開に比べて展開完了時刻は 31.1% 早く、オーバーシュートは 385% 増大すると推定された。

6. 結論

展開ブーム構造の軌道上での展開挙動の推定法の確立のために、数値解析モデルの作成、航空機実験との比較による妥当性の評価、限定的な地上実験によるパラメータ取得の検証を行った。その結果、展開完了時刻で 4.5%、展開長さで最大 1.6% の精度で一致し、数値解析モデルが妥当であることが確認できた。また、限定的な地上実験だけで、パラメータ同定を行えることを示したことから、軌道上での展開挙動推定法の確立を達成した。展開ブームの非同期運動を推定するためには、巻きつけの初期状態や、展開ブーム固有特性の影響のさらなる考慮が必要であることが分かった。

謝辞：

本研究は、文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費の支援により実施されました。また、日本大の山崎先生、宮崎先生、東工大の大熊先生、Xu Shuyin さんに多大な援助を賜りました。さらに、宇宙科学研究所ソーラーセイル WG の皆様には、多くの助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] O. Mori, et al, “First Solar Power sail Demonstration by IKAROS” International Symposium on Space Technology and Science, 2009-o-4-07v, 2009.
- [2] 坂本啓ら, 3U キューブサット OrigamiSat-1 による高機能展開膜構造の宇宙実証, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4610, 2016.
- [3] N. Okuizumi, et al, “Numerical Simulation of Stepwise Deployment of Membrane Structure with Booms using Multi-Particle Approximation Method” o.c-56,29th ISTS, 2013.
- [4] 山崎政彦ら, 航空機パラボリックフライトによる宇宙展開構造物の微小重力環境試験, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4282, 2016.
- [5] 古谷寛ら, ブーム・膜複合構造の微小重力下における展開挙動, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4284, 2016.
- [6] 八島京平ら, 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, 第 32 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2016.