

コンベックステープを用いた膜面展開型

デオービット機構の開発

Development of Development of Membrane Deployment de-orbit System by convex tapes

宮崎研究室

多田 伸

Abstract: In recent years, space utilization of a membrane deployment structure has been attracting attention in many researchers. For example, membrane deployment structure is used for solar sails and de-orbits system. The de-orbit system is required light weight and excellent storage property for dropping the nano-satellite in atmosphere. Therefore, membrane deployment structure has been studied to be applied for the de-orbit system. There have been proposed two deployment method, one of which is spin deployment and the other is the deployment by the assist of the self-extending convex tapes. The purpose of this study is to demonstrate and investigate the concepts of the de-orbit systems which consists of thin membranes and convex tapes.

1. 序論

1.1. 背景

近年、宇宙用膜面展開構造物が注目されている。膜面構造物は、ソーラーセイルとして用いられている他、デオービット機構としても用いられている。膜面を宇宙で展開する方法にはスピン展開や、伸展部材を用いた展開方法が提案されている。その中でもコンベックステープを用いた展開手法は大型の機器を必要とせず、十分な伸展力が得られるために超小型な人工衛星にも搭載可能である。実際に、NASAが開発した Nanosail-D2^[1]や Clyde space が開発したデオービット機構 AEOLDOS^[2]には膜の伸展部材としてコンベックステープが用いられている。

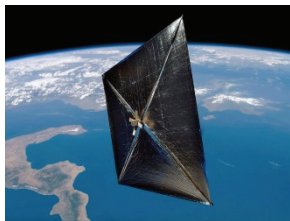


図 1 Nanosail-D2



図 2 AEOLDOS

1.2. コンベックステープを用いたデオービット機構

前述の”コンベックステープ”とは、市販のストレッチメジャーに代表されるような一定の曲率を持った金属製のテープである。

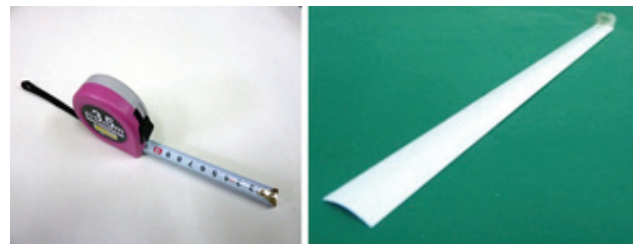


図 3 コンベックステープ

このコンベックステープをハブに巻きつけると自らの弾性力により元に戻ろうとする。この運動を一方方向に拘束することで自己伸展力を発揮することができる。

1.3. 問題点

コンベックステープが伸展中にハブから剥離する現象が展開挙動に大きく影響を与え、スムーズな展開の妨げになる。よって剥離条件を明らかにすることはデオービット機構の開発において重要である^[3]。

1.4. 本研究の目的

コンベックステープを自己伸展部材とした膜面展開システムは、既に多くの地上実験にて膜面展開を成功させており、実用化されつつある。しかし、膜面が展開にどのように影響を与えているのか議論されていることが少ない。そこで、本研究では 2 つを目的とする。

- 再現性が高く、安定して膜を展開できるコンベックステープを用いた超小型人工衛星に搭載可能な展開システムを製作する。
- 膜面が伸展挙動に不具合を与えるパラメータを明らかにする。

以上により，コンベックステープを用いた展開システムの信頼性の向上に寄与することを目指す．

2. 実験

超小型人工衛星に搭載可能なデオービット機構の試作し，その特性を把握するために以下の3つの実験を行った．

- ・ 剥離限界力の測定
- ・ 膜をつけた状態でのコンベックステープの展開挙動の撮影
- ・ 異なる折り方による膜面展開率の比較

2.1. 自作したデオービット機構

3U(10cm×10cm×30cm)サイズの超小型人工衛星(4kg)を10年以内に落とすことを目的として，市販されているスチールメジャーを用いたデオービット機構を製作した．膜取付部に折り畳んだ膜を取り付け，コンベックステープを用いて膜を展開させる．

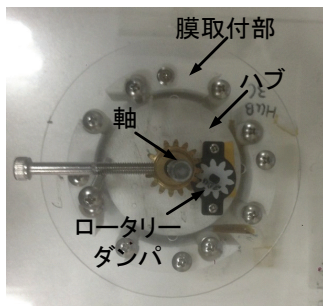


図4 デオービット機構試作機

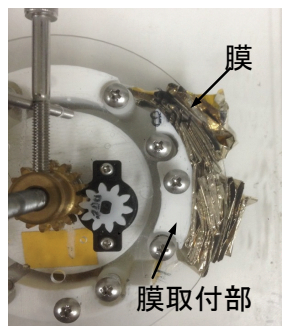


図5 膜取付時

表1 デオービット機構諸元

ハブ径	18[mm]	膜取付外径	37.5[mm]
ローラー径	8[mm]	テープ長	590[mm]
上天板径	42.5[mm]		

表2 コンベックステープの諸元

曲率半径	14.2[mm]	ヤング率	127[GPa]
厚さ	0.1[mm]	ポアソン比	0.3[-]
幅	13[mm]	曲率	52.2[rad/m]

膜面積の決定に当たっては，軌道計算ソフト「DEMIST」を用いて膜面積と軌道寿命との関係を求めた．その結果，10年以内に衛星を大気圏に再突

入させるためには，膜面積が 0.3 m²あれば十分であることがわかった．本研究では，図3に示すような，コンベックステープ2本と0.15 m²の台形膜1枚から成る膜構造を図7のように2つ組み合わせたデオービット機構を開発した．またハブ径が小さく回転速度が速くなりすぎるため^[4]ロータリーダンパを用いて速度を調整する．

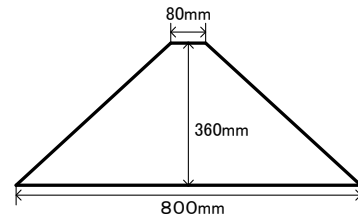


図6 膜モデル(1枚)

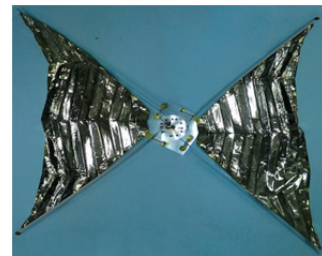


図7 膜展開後のデオービット機構

2.3. 剥離限界力計測実験

テープの剥離が開始するときの荷重を図8のように測定した．

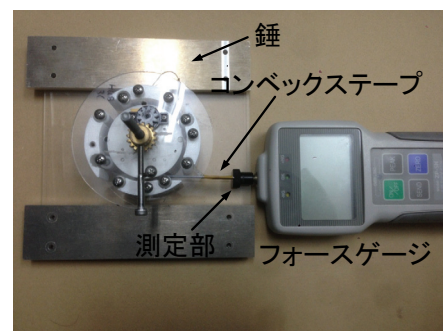


図8 剥離限界力計測実験装置図

軸が回転しないように固定した状態でコンベックステープにフォースゲージの測定部を押し当て，テープが剥離し始めたときの出力値を読み取った．3回測定を行った結果，平均値が0.225[N]となった．

この結果から膜面を取り付けた際，剥離せずにテープが伸展するためには膜による展開拘束力が0.225[N]以下となるように設計すればよいことがわかった．

2.4. 膜面を付けた際の展開挙動

膜面がコンベックステープの伸展挙動に与える影響を評価するため、コンベックステープのみで膜を取り付けないもの、ミウラ折りで畳んだ膜面を取り付けたもの、蛇腹折りで膜面を取り付けたもの、以上の3パターンで実験を行い、ハブの角速度による違いを調べた。今回は2本のコンベックステープと1枚の膜を用いて展開挙動をハイスピードカメラで撮影した。撮影風景を図9、実験結果を図10に示す。



図9 撮影風景

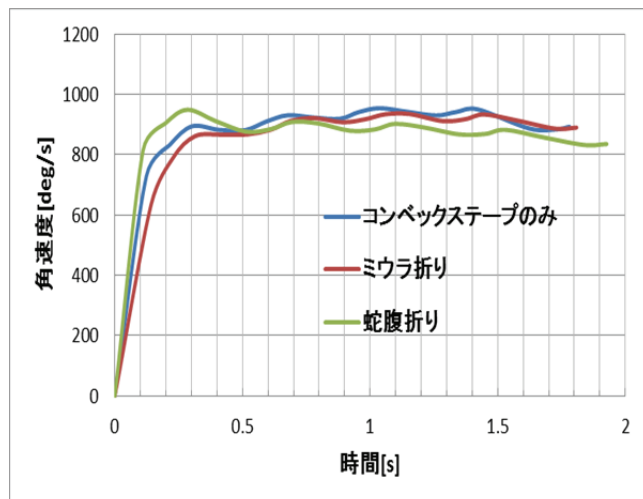


図10 ハブの角速度の時間変化

表3 伸展終了時間

	伸展終了時間[s]
コンベックステープのみ	1.781
ミウラ折り	1.809
蛇腹折り	1.927

図10より、どのパターンも伸展終了間際に角速度が極端に下がっていることが分かる。これは、伸展終了間際になると、内側のテープを外側のテープが押さえつけることがなくなり、その結果、テープの巻き付け曲率が小さくなり、伸展力が小さくなるためである。その挙動を図11に示す。

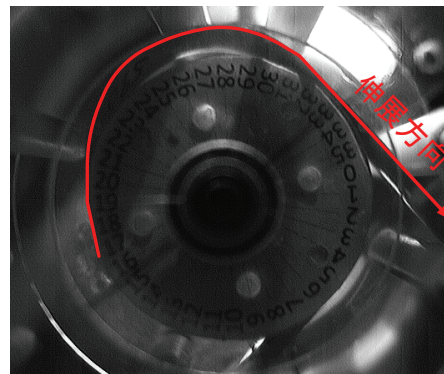


図11 伸展終了間際のコンベックステープの挙動

コンベックステープのみとミウラ折りの角速度、伸展完了時間は蛇腹折りと比べると差が少ない。ミウラ折りの場合、膜面がテープの伸展に及ぼす影響は小さいと考えられる。蛇腹折りの場合、1[s]以降に角速度が減少し続けている。蛇腹折りの1[s]以降の展開挙動を以下に示す。



図12 蛇腹折り 1[s]



図13 蛇腹折り 1.4[s]

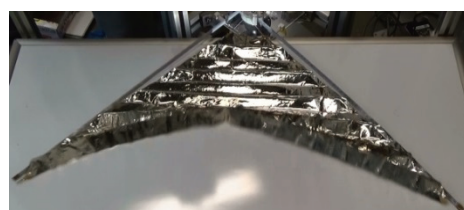


図14 蛇腹折り 1.6[s]

以上から、展開開始から1秒後から膜にテンションがかかり始めていることが分かる。これによりコンベックステープが伸展する方向とは逆方向に力が働き、角速度が下がったものと考えられる。また、ミウラ折り、蛇腹折りの展開中に剥離現象は見られなかった。よって、どちらも展開挙動に不具合を与える力、すなわち、膜面による展開拘束力は剥離限界力(0.225[N])までには至らなかったことがわかる。

2.5.膜面展開率の比較

展開成否の手段として面積展開率という指標を用

いて、評価する。これは

$(\text{面積展開率}) = (\text{展開後面積}) / (\text{計算された展開面積}) [\%]$ で表される。

今回は1枚を展開させ比較した。展開完了後の写真を以下に示す。



図 15 ミウラ折り展開後



図 16 蛇腹折り展開後

ミウラ折りは力を一定方向に加えるだけで容易に展開することが可能であり、面積展開率が約 90%になった。また、蛇腹折りは膜先端に十分に力が伝わらず、面積展開率は約 80%となった。

ミウラ折りの膜面積展開率であれば1枚の膜面積が 0.135 m^2 となり合計膜面積は 0.27 m^2 、軌道寿命 3.67 年、蛇腹折りの膜面積展開率であれば、1枚の膜面積が 0.12 m^2 となり合計膜面積は 0.24 m^2 、軌道寿命が 3.84 年になると考えられる。

3. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- ・自作したデオービット機構での膜展開ではハブからコンベックステープが剥離せずに展開することが確認できた。
- ・膜面によるコンベックステープの展開挙動への影響は折り方により異なる。ミウラ折りの場合は展開挙動への影響は小さく、蛇腹折りの場合は展開挙動に影響を与えることが実験から確認できた。
- ・以上より、ミウラ折りの台形膜面と2本のコンベックステープと収納機構から成る台形型の膜展開機構により、3UのCubeSatに搭載可能なサイズのデオービット機構が実現できることを示した。

4. 今後の展望

今回の実験結果を踏まえて、超小型人工衛星に搭載可能なデオービット機構の設計、製作を行い、コンベックステープを用いた展開システムの信頼性を高め、宇宙実証の提案をしていきたい。

5. 参考文献

[1]Grant.M.Thomas,Prototype Development

And Dynamic Characterization of Deployable CubeSat, Booms March 2010

[2]Patrick H, Malcolm M, Paul L, Ross M,

Andrew F, Craig C, Development status of AEOLDOS – A deorbit module for small satellite, Advances in Space Research, Volume 54 Issue1 July 2014

[3]鈴江隼太：コンベックステープを用いた膜面展開システムの展開条件，日本大学卒業論文，2014

[4]相浦啓司：膜面宇宙構造物の伸展部材用コンベックステープの展開挙動に関する研究，日本大学大学院修士論文，2013