

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

Development Behavior of Convex Tapes as Extension Booms of Membrane Space Structure

指導教授 宮崎康行

M1001 相浦啓司

1. 序論

1.1. 背景

近年、宇宙用膜面展開構造物が注目を浴びている。一昨年、小型ソーラー電力セイル実証機“IKAROS”では、膜面を遠心力で展開する方法が実証された。膜面を宇宙で展開する方法にはこの他にも、インフレータブルチューブを用いる方法や、ばね性を有する弾性素材を用いる方法が提案されている。

膜面構造物は、“IKAROS”のようにソーラーセイルとして用いられている他、地球周回の衛星に搭載されるデオービット機構としても用いられつつある。その一例として次世代宇宙技術システム研究組合で現在開発が進められている50kg級の小型人工衛星“RISESAT”では、1辺2.5mの正方形膜面を軌道上で展開しデオービット機構として用いる予定である。

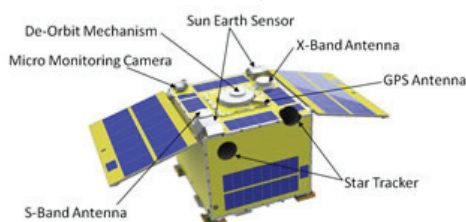


図1 理学観測衛星“RISESAT”

1.2. コンベックステープを用いた膜面展開システム

膜面構造物を50cm立方、50kg級の小型衛星のデオービット機構として用いる場合には、軌道高度にもよるが、およそ2.5m四方の膜面を展開する必要がある。この程度の大きさの膜面を展開する方法として、市販のスチールメジャーに代表される「コンベックステープ」を、膜面の伸展部材として用いる方法が提案されている。

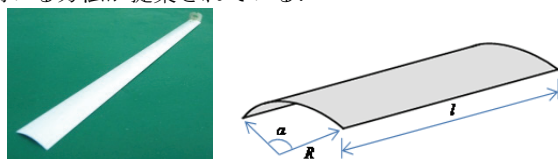


図2 コンベックステープ（左図は20cmに切り出したスチールメジャー）

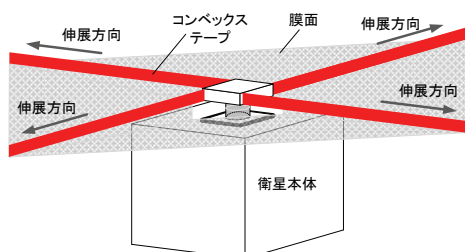
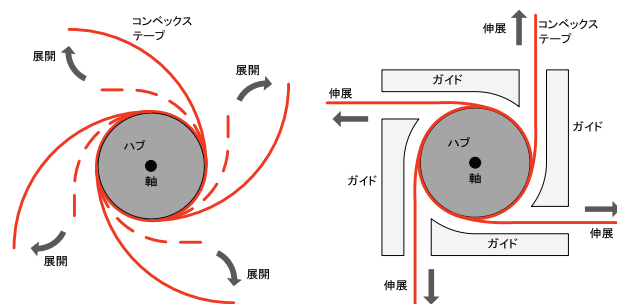


図3 コンベックステープを用いた膜面展開システム

この方法は、ハブに巻きつけられたコンベックステープが、ほどけて元に戻ろうとする際の弾性力を利用したものである。

コンベックステープを用いた膜面展開システムには、図4(a)のようにハブに巻きつけてあるテープが外側に向かってほどけながら展開していく方式と、図4(b)のように1軸回転

自由のハブの周囲にガイドレールを設置することで、テープをガイドレールに沿った一定の方向に直進させる方式がある。



(a) ガイドレール無し (b) ガイドレール有り
図4 膜面展開システム

1.3. 本研究の目的

コンベックステープを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。

コンベックステープについては、力を加えた際にどのように変形するかと言ったことが、過去にPellegrinoらによって研究されている^[2]。しかし、機構そのものの展開メカニズムに関してはこれまでほとんど研究が成されていない。従って、展開そのものは成功しているものの、それがどのように行われているのか把握されていない現状である。

そこで、本研究の目的を以下にまとめる。

- 膜面展開システムの展開挙動を把握し、膜面展開に影響を与える要因を明らかにすること
- それにより膜面展開システムの展開信頼性の向上に寄与すること

1.4. 本研究でのアプローチ

この膜面展開システムの構成要素は主に、膜面本体、伸展部材となるコンベックステープ、コンベックステープを保持するハブ、及びコンベックステープの伸展を導くガイドレールから成る。

本研究ではこのうち、伸展部材となるコンベックステープの挙動に着目した。すなわち、コンベックステープが膜面展開中にどのような伸展挙動を示すかを明らかにすることに主眼を置いている。そのため、膜面本体の展開挙動や、膜面がシステム全体に及ぼす影響については本研究では言及せず、今後の研究課題とした。

本研究では、コンベックステープ、ハブ、ガイドレールから成る膜面展開システムのモックアップ（コンベックステープの自己伸展機構）を作成した。展開中の挙動をカメラで撮影し、その結果を基に、コンベックステープの展開挙動を考察する。

2. コンベックステープの理論

ここでは、展開実験の結果に先立ち、コンベックステープに作用するモーメントと曲げ、ひずみエネルギーの関係および簡略化したダイナミクスについて述べる。

コンバックステープとは、図 2 (b)のように曲率半径 R ，中心角 α の曲断面をもつ長さ l ，厚さ t の弾性素材である。このような部材に対して、円筒シェル理論^[3]を適応して解析する。

初めに、コンバックステープの座標系と、モーメント及び曲げの方向を以下のように定義する。なお、コンバックステープのねじれが与える影響に関しては本研究では言及しない。

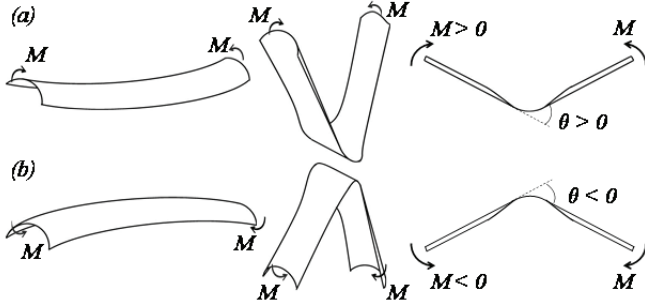
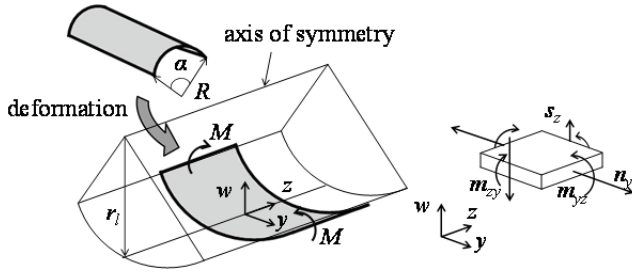


図 5 モーメントと回転の方向の定義



(a) テープの座標系 (b) テープの微小要素

図 6 座標系の定義

テープの曲げ剛性を D ，テープの縦方向（長手方向）の曲げの曲率を κ_l ，テープの横方向（断面の幅方向）の曲げの曲率を κ_t とする。このとき、テープの微小要素に働く単位長さあたりの曲げモーメント m_{zy} ， m_{yz} ，軸力 n_y ，およびひずみエネルギー u は、

$$m_{zy} = D[\kappa_t + \nu\kappa_l] \quad (1)$$

$$m_{yz} = D[\nu\kappa_t + \kappa_l] \quad (2)$$

$$n_y = \frac{Et}{r_l} w \quad (3)$$

$$u = \frac{1}{2} D (\kappa_l^2 + 2\nu\kappa_t\kappa_l + \kappa_t^2) \quad (4)$$

と表すことが出来る。ただし、 ν はテープのポアソン比である。また、テープの幅 b に対して厚さ t が小さいため、微小要素の単位幅あたりの曲げ剛性 D は

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

とおくことができる。 E はヤング率である。

図 6 (a)のように、テープの均一な曲げ状態からの縦半径方向の変位を $w(z)$ とすると、曲率 κ_l ， κ_t はそれぞれ

$$\kappa_t = \frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{1}{R} \quad (6)$$

$$\kappa_l = \frac{1}{r_l} \quad (7)$$

と表すことが出来る。 w は 4 次の微分方程式で与えられ、テープの軸対称性等を考慮しその解は以下のように表現される。

$$w = C_1 \cosh \frac{nz}{r_l} \cos \frac{nz}{r_l} + C_2 \sinh \frac{nz}{r_l} \sin \frac{nz}{r_l} \quad (8)$$

$$n = \sqrt[4]{3(1-\nu^2)} / \sqrt{\alpha t} \quad (9)$$

式(8)，(9)を式(1)，(2)に代入し、 m_{zy} および m_{yz} は

$$m_{zy} = D \left[\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{1}{R} + \nu \frac{1}{r_l} \right] \quad (10)$$

$$m_{yz} = D \left[\nu \left(\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{1}{R} \right) + \frac{1}{r_l} \right] \quad (11)$$

となる。

従って、単位長さあたりに生じるモーメント m_{yz} ，および軸力 n_y と偏差 w によるモーメントを断面にわたって積分することにより、テープの断面に生じる曲げモーメントは

$$M = \int_{-Ra/2}^{Ra/2} (m_{yz} - n_y w) dz \quad (12)$$

となる。

特に、 $w=0$ かつ $r_l=R$ の場合、

$$m_{yz} = \frac{D(1+\nu)}{R} \quad (13)$$

となる。本研究では、コンバックステープを常に負の方向に曲げて取り扱うため、曲率 $\kappa_l = -1/R$ となり、従って曲げモーメント M は

$$M = -D(1-\nu)\alpha \quad (14)$$

と表すことが出来る。また、曲げモーメントによって蓄えられる単位長さあたりのひずみエネルギー u は

$$u = \frac{D(1-\nu)}{R^2} \quad (15)$$

であり、テープ全体が蓄えるひずみエネルギー U は

$$U = D(1-\nu)\alpha\theta \quad (16)$$

となる。

なお、式(16)，及びコンバックステープの運動エネルギーに関する式を用いて展開システムのラグランジアン L を記述し、ハブの回転角 ϕ を一般化座標として Lagrange 方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} = Q \quad (17)$$

を記述することが可能である。式(17)を解くことにより、最終的に以下の式(18)を得る。

$$(\rho l r^2 + I) \ddot{\phi} + 4D(1-\nu)\alpha = 0 \quad (18)$$

ρ はテープの線密度、 l はテープの長さ、 r はハブの半径、 I はハブの慣性 2 次モーメントである。

これにより、展開システムのダイナミクスを記述することが出来た。

3. コンバックステープの展開実験

3.1. 展開システムの製作

ここでは、製作した展開システムについて述べる。

まずコンバックステープについては、1.2 で述べたように、おおよそ 2.5m 四方の膜面を展開できる必要がある。これは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のデブリ発生防止標準支援

ツール”DEMIST”を用いた軌道寿命の計算結果から求めた。以下に軌道寿命の計算結果と、そこから導かれる膜面の大きさ、及びコンベックステープの必要長さの算出過程について示す。

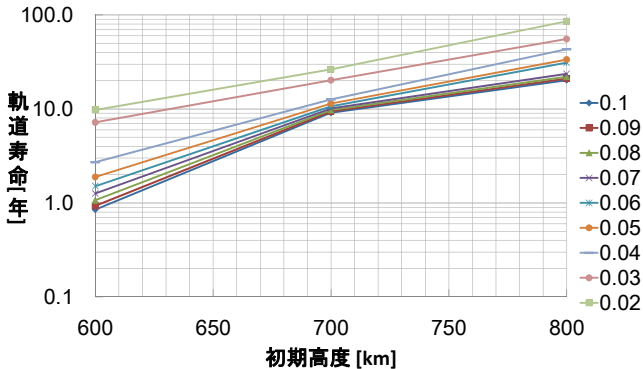


図 7 軌道高度と軌道寿命の関係

表 1 初期高度と面積質量比毎の軌道寿命[year]
面積質量比 [kg/m²]

高度 [km]	0.1	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02
600	0.8	0.9	1.1	1.3	1.5	1.9	2.7	7.2	9.7
700	9.1	9.4	9.7	10.1	10.7	11.4	12.6	20.2	26.3
800	20.2	21.1	22.1	23.6	31.1	33.6	43.2	55.5	85.8

表 1 より、衛星の初期高度を 800[km]とすると、25 年以内に軌道寿命を迎えるためには面積質量比が 0.07[kg/m²]必要であり、質量 50[kg]の衛星では有効断面積が 3.5[m²]必要となる。有効断面積は衛星の全表面積の 25%であるので、衛星の表面積は 14[m²]必要となる。衛星本体を 50[cm]四方の立方体とすると、表面積が 1.5[m²]となり、そのため膜面の表面積は両面合わせて 12.5[m²]必要となる。従って、膜面を正方形

とすると、その大きさは 2.5[m]四方となる。図 3 の様に、膜面の対角線方向にコンベックステープを伸展させるとすると、テープ本当たりの長さは約 1.8[m]となる。

この長さのコンベックステープを 4 本巻き付けられるようなハブ径とガイドレール径をパラメータとして展開システムを製作する。ここで、ハブ径が小さいほど展開時間は短くなり、大きいと展開時間は長くなる。市販のスチールメジャー等を参考にし、ここではハブの直径を 38[mm]とした。ガイドレール径に関しては、ハブに巻きつけたコンベックステープとの間に十分な隙間ができるよう、半径を 124[mm]とした。製作した展開システムを図 8 に、その諸元を表 2 に示す。

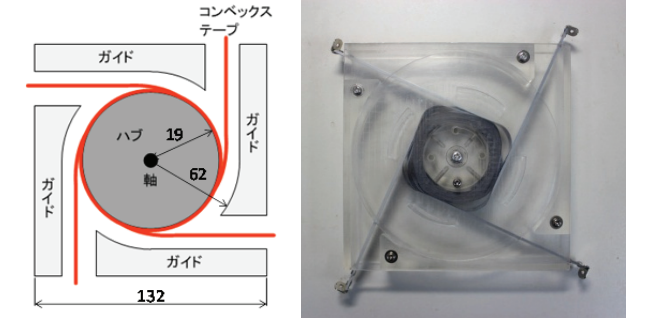


図 8 展開システム概念図 (左) とモックアップ (右)

表 2 膜面展開システム諸元

ハブ径	19 [mm]	テープ長	1800 [mm]
ガイド径	62 [mm]	テープの曲げ径	14 [mm]
最外径	132 [mm]	テープの曲げ中心角	50.7 [deg]

3.2. 展開実験結果およびその考察

製作したモックアップを用いて展開実験を行い、展開の様子をカメラにて撮影した。以下に展開挙動を撮影したカメラ画像の一部を示す。なお、図 8 とは表裏が逆転している。

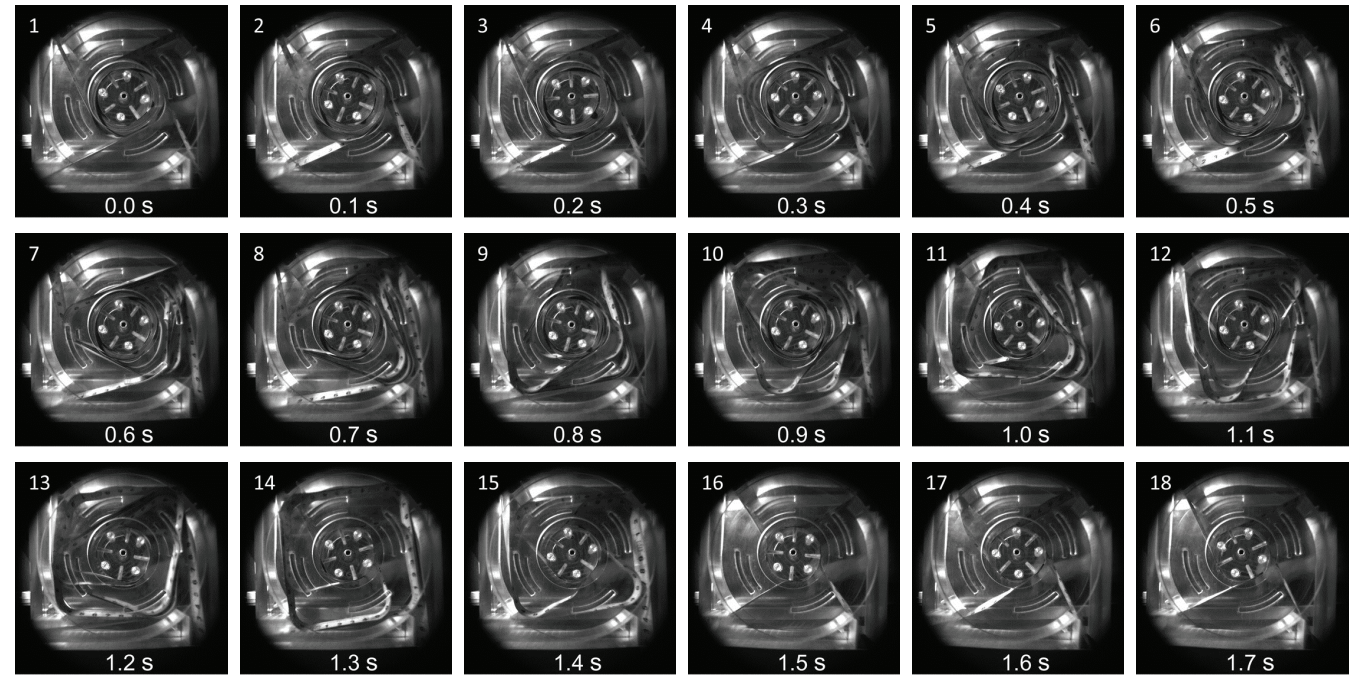


図 9 展開実験の様子 (1/10[s]毎)

図9は展開に成功した際のカメラ画像であり、150[fps]で撮影した画像のうち、1枚目を時刻 $t=0[s]$ として1/10[s]毎の画像を並べたものである。展開開始から約1.5[s]でコンベックステープが伸展し終わっていることが分かる。図10は図9の4枚目($t=0.3[s]$)、5枚目($t=0.4[s]$)、10枚目($t=0.9[s]$)および11枚目($t=1.0[s]$)の画像を拡大し、4本のコンベックステープの内のある1本の展開挙動について着目したものである。

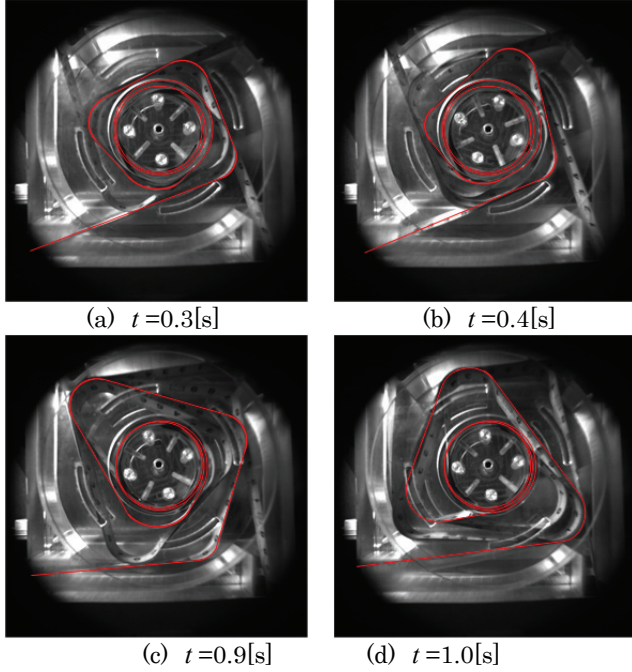


図10 1本のコンベックステープの展開挙動

図10からも分かる通り、ハブから解けたコンベックステープは図4(b)のようにガイドレールに沿って滑らかに曲げを生じて伸展するのではなく、実際には曲げによる弾性的な折り目を生じながら伸展している。これは、テープが展開時にガイドレールから受ける外力によって生じるものである。ハブに加わる角加速度はほぼ一定であるため、折り目が生じるとテープの伸展速度がハブの回転速度に追いつかなくなり、折り目そのものがハブから逃げるように半径方向に伸展する挙動を示している(図10(a)から(b))。半径方向に伸展した折り目が、図10(c)の左上や図10(d)の上の部分のようにガイドレールと接触すると、摩擦力が増加し展開を妨げる要因と成り得る。そのため、ガイドレールから受ける拘束力による影響を定量的に把握できることが望ましい。そこで、最も簡単なコンベックステープが1本である場合について、テープが展開中にガイドレールから受ける拘束力を考える。

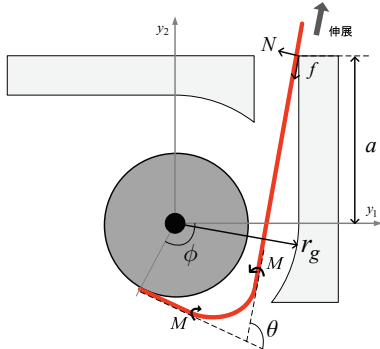


図11 テープがガイドレールから受ける拘束力

図11のように、コンベックステープはガイドレールから垂直抗力 N と摩擦力 f を受ける。これらの外力がコンベックステープに与える軸周りの曲げモーメント M は

$$M = \{r_g \sin(\theta - \phi) - a \cos(\theta - \phi)\} \cdot N + \{r_g \cos(\theta - \phi) + a \sin(\theta - \phi)\} \cdot f \quad (19)$$

であり、摩擦力 f は動摩擦係数 μ を用いて

$$f = \mu N \quad (20)$$

であるので

$$M = \left\{ \left(a + \frac{r_g}{\mu} \right) \sin(\theta - \phi) - \left(\frac{a}{\mu} - r_g \right) \cos(\theta - \phi) \right\} \cdot f \quad (21)$$

一方、K. A. Seffen と S. Pellegrino の研究^[2]により、折り目縦方向の半径は、ほとんどの場合でテープの横方向の初期半径 R に大よそ一致することが知られており、従ってその時の曲げモーメント M は式(14)に一致する。式(21)と式(14)より

$$f = \frac{D(1-\nu)\alpha}{-\left(a + \frac{r_g}{\mu} \right) \sin(\theta - \phi) + \left(\frac{a}{\mu} - r_g \right) \cos(\theta - \phi)} \quad (22)$$

式(22)において、 $f > 0$ でなければならないので、次の式(23)が言える。

$$\frac{a - \mu r_g}{\mu a + r_g} > \tan(\theta - \phi) \quad (23)$$

式(23)の左辺の値が小さいほど、折り目が小さくガイドレールに沿って滑らかにコンベックステープが伸展する。この条件の下、ハブ及びガイドレールを設計することが望ましい。

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- コンベックステープの展開のダイナミクスを定式化した(式(18))
- デオービットに必要な膜面の面積と質量との関係を明らかにし(表1)、50[kg]級小型衛星に必要な膜面展開システム的设计案を示した(表2)。
- 膜面展開システムのうち、コンベックステープの自己伸展機構の運動を高速度カメラにより撮影し、展開が成功する場合としない場合との違いを明らかにすると共に、理論解析により展開が成功するための条件(式(23))を求めた。

コンベックステープを用いた膜面展開システムの展開実験を行い、その結果からテープの展開挙動を把握・定式化した。これにより、膜面展開システムの展開信頼性の向上に寄与することが出来ると考える。

今後は設計の条件を変えて実験を行い、展開に寄与するその他の要因を考察すると共に、膜面の影響も考慮することが望ましい。また実験による解析の他、有限要素法等による展開シミュレーションを行い、更なる展開信頼性の向上に努めることが望ましいと考える。

5. 参考文献・出典

- [1] 超小型衛星センター：
<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/nsat/hodo2.html>
- [2] K. A. Seffen and S. Pellegrino: Deployment dynamics of tape springs, PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A, 455, 1003-1048, 1999.
- [3] Calladine, C.R.: Theory of shell structures, Cambridge University Press, 1983.
- [4] 小林繁夫, 近藤恭平: 弾性力学, 培風館, 1987