S192012

膜面宇宙構造物用コンベックステープの展開挙動に関する研究

嶋崎 信吾^{*1}, 相浦 啓司^{*1}, 村田 亮^{*1}, 三田 恭平^{*1}, 宮崎 康行^{*2}, 桑原 聡文^{*3}

Development Behavior of Convex Tapes for Membrane Space Structure

Shingo SHIMAZAKI^{*1}, Keiji AINOURA, Ryo MURATA, Kyohei MITA, Yasuyuki MIYAZAKI,
and Toshinori KUWAHARA^{*1} Nihon University Department of Aerospace Engineering
Narashinodai 7-24-1, Funabashi-shi, Chiba, 274-8501 Japan

Recently, deployable membrane structure has been applied to deorbit mechanism for small satellite. One way to deploy membrane structure is to use convex tapes as extension booms. This membrane deployment mechanism is simple and lightweight. Convex tapes winding around a spool store strain energy. Putting some guide rails around the spool, the convex tapes unwind from the spool and extend straight along the guide rails like extension booms. We will make two kind of guide rails and perform deployment test. In this report, we will show deployment dynamics of convex tapes, and show result of two kind of examination.

Key Words : Deployable Structure, Convex Tapes, Tape springs, dynamics

1. はじめに

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. 2010 年に, 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“RISAT”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.

1・2 コンベックステープを用いた膜展開機構

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」を伸展部材として用いる方法が提案されている.

Fig.1 Convex Tape

^{*1} 日本大学大学院 理工学研究科 航空宇宙工学専攻^{*2} 正員, 日本大学 理工学部 航空宇宙工学科^{*3} 東北大学

E-mail: shimazaki@forth.aero.cst.nihon-u.ac.jp

このシステムは円柱状のハブに巻きつけられたコンベックステープを弾性力によって、元の直線状に戻ろうとする性質を利用したものである。この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により、テープを一定の方向に直進させることができる。

Fig.2 Membrane Deployment System

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。そのため、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、本研究では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によってそれにより膜面展開システムの展開信頼性の向上を目的とする。

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巻きつけるハブ、及びコンベックステープの伸展方向を誘導するガイドレールの4つである。

本研究では、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。そこで、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）を製作した。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展開実験

2・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。50kg級の小型衛星のデオービットに膜面を用いる場合、およそ2.5m四方の膜面を展開できる必要がある。図2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、テープ一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。コンベックステープには市販のスチールメジャー（曲げ径14[mm]、中心角50.7[deg]）を使用し、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、半径を62[mm]（タイプA）と42[mm]（タイプB）の二種類を製作した。

Fig.3 Mock-Up Model

2・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，展開の様子を下部から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．

Fig.4 Development Behavior (Type-A)

Fig.5 Development Behavior (Type-B)

図4はタイプAの展開に成功した際のカメラ画像であり、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。

図5はタイプBの展開挙動をカメラで撮影したものである。こちらは展開開始直後から、コンベックステープがガイドレールに接触し、出口からほとんど進展することなく止まってしまっていることが分かる。ハブはその間も回転し続け、 $t=0.225[s]$ で収束している。

タイプAに関して、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注目した。

Fig.6 Development Behavior of a Convex Tape

図6からも分かる通り、ハブからの拘束が解けたコンベックステープはFig. (b)のように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、ガイドレール内で折り目が生じてしまう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6(a)から(b)。さらに伸展した折り目が、図6(c)の左上や(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することが望ましい。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。

Fig.7 Binding Force by Guide rail

図7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

$$M = -\{r_g \sin(\phi - \theta) + a \cos(\phi - \theta)\} \cdot N + \{r_g \cos(\phi - \theta) - a \sin(\phi - \theta)\} \cdot f \quad (1)$$

であり、 $f = \mu N$ を代入して

$$M = \left\{ -\left(a + \frac{r_g}{\mu}\right) \sin \phi - \theta - \left(\frac{a}{\mu} - r_g\right) \cos \phi - \theta \right\} \cdot f \quad (2)$$

一方, K. A. Seffen と S. Pellegrino の研究⁽²⁾により, コンベックステープに生じる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いる. その場合, 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_{yz} は,

$$m_{yz} = \frac{D}{R} (1 + \nu) \quad (3)$$

と表せる. 本研究では, コンベ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 $k_l = -1/R$ となり, 従って曲げモーメント M は

$$M = -D (1 - \nu) \alpha \quad (4)$$

となる. これを(2)式に代入して

$$f = \frac{D (1 - \nu) \alpha}{\left(a + \frac{r_g}{\mu}\right) \sin \theta - \phi + \left(\frac{a}{\mu} - r_g\right) \cos \theta - \phi} \quad (5)$$

式(5)において, f はコンベックステープの伸展を阻害する摩擦力であり, 伸展に対して常に反対の方向に働くため, $f > 0$ でなければならない. D は曲げ剛性, α はコンベックステープの横方向の初期曲げの中心角であり, 常に正の値をとる. また, ν に関してはポアソン比であり 1 以下の値であるので, $1 - \nu > 0$ となる. 従って,

$$\frac{a - \mu r_g}{\mu a + r_g} > \tan \theta - \phi \quad (6)$$

となる. 式(6)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といえる.

3. 結論

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(6)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.

今後はガイド径だけでなく, コンベックステープの幅や, ハブ系についても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れる. 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.

4. 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
- (5) 相浦啓司, 嶋崎信吾, 宮崎康行, 栗原聡文: 膜面構造物の伸展部材用コンベックステープの展開挙動解析, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2012-4494, 2012