

1. 序論

1.1. 背景

近年、天文衛星をはじめ、高精度観測の要求が高まっている。高精度展開構造物としての代表的な例は、Astro-H (図 1.1 左) などに利用されている伸展マストや、ETS-VIII (図 1.1 右) などの展開アンテナなどが挙げられる。

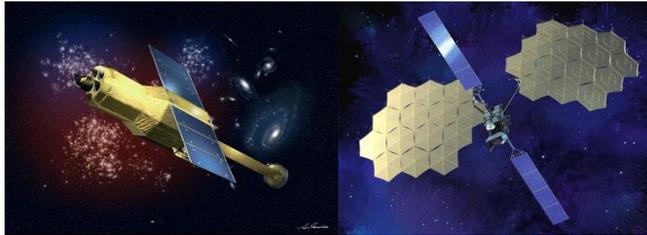


図 1.1 (右 : Astro-H, 左 : ETS-VIII)^{[1][2]}

それに伴い、従来は許容誤差として扱われてきたパネル結合部の結合誤差が無視できないほど、アンテナに対して高い形状精度が求められるようになってきており、従来と比べ桁小さな精度が要求されている。そのため、高精度展開アンテナなどでは、結合部のはめあい(ガタ)を小さくしすぎると開かなくなってしまうため、結合部の取り付け誤差やガタを小さくし、展開することが出来るか予測する技術が必要となっている。

また、超小型衛星用の SAP (Solar Array Panel) (図 1.2) の展開ヒンジや保持・解放機構など、コストを低減しつつ、必要な信頼性が確保され、かつ、地上での検証が容易な展開デバイスが必要とされるケースも多くなってきている。SAP の展開機構は安価で確実に展開することが求められているため、ある程度ガタを持たせ、確実に展開させた後にラッチ機構で位置決めを行うシステムが多い。そこでは、確実に展開させるためにガタをどの程度持たせると安定して展開するかといった技術が求められている。

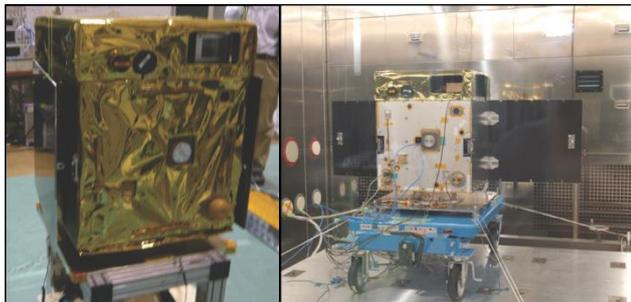


図 1.2 ほどよし衛星(左 : 展開前, 右 : 展開後)^[3]

また、将来、より大きな展開構造物を展開させる際、現在までの蛇腹折りや観音開きと言った一次元展開運動ではなく、ミウラ折りをはじめとした二次元・三次元展開運動を展開パネルで実現することが求められている。この場合、パネルの厚みや連結部(ヒンジ)の取り付け誤差等を考慮した上で、どこにヒンジを取り付けるのか、ヒンジにはどの程度のはめあい(ガタ)をもたせる必要があるかを見積もって設計・開

発を行う必要があるが、展開運動の複雑さゆえ、それを見積もることは容易ではない。

以上のように、取り付け誤差や厚みなど、与えられた条件のもとで展開を行うために必要なヒンジのガタ(はめあい)の値を求める手法が必要とされている。また、展開をより確実にを行うためには、ヒンジ部やパネルの変形を利用するのではなく、全て剛体と仮定しても展開するような設計にする必要がある。

1.2. 本研究の目的

1.1 節の背景を踏まえ、本研究では、剛体パネル構造において、パネルの厚みやジョイントの取付誤差を考慮した際の、ヒンジ部に必要なガタを求める理論を提案する。そして、その理論を用いて、ガタが展開性に与える影響の評価を行うことを目的とする。具体的には、本研究では二次元展開の基本方式であるミウラ折りを用いてパネルを展開させる際、連結部のガタの動きと大きさによって展開性がどの程度変わってくるのかを解析・評価する。ミウラ折りとは、図 2.1 のように複数枚の平行四辺形で山と谷折りから成っており、対角の両端を引っ張ることで簡単に二次元展開できる折り畳み方である。

2. 理論

2.1. モデルの定義

ここでは、ミウラ折りをモデルとして、4枚のパネルを折り畳む際の運動の理論を示すとともに、連結部のガタの定義、最急降下法、ペナルティ法について述べる。表 2.1 に解析モデルの諸元を示し、図 2.1 に運動モデルを示す。

表 2.1 モデルの諸元

α	パネルの角度
a, b	パネルの辺の長さ
h	パネルの厚み
$\theta (0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ)$	パネル 1,4 とパネル 2,3 のなす角度
$\beta = \arccos(\cos \alpha / \cos \theta)$	パネル 1,2(3,4) がなす角度
R_{1-4}	各パネルの基底マトリクス
q_{1-4}	各パネルのクォータニオン
x_{1-4}	各パネルの中心位置
$y_{1,2}^j$	ジョイントの取付位置
$q_{1,2}^j$	ジョイントのクォータニオン

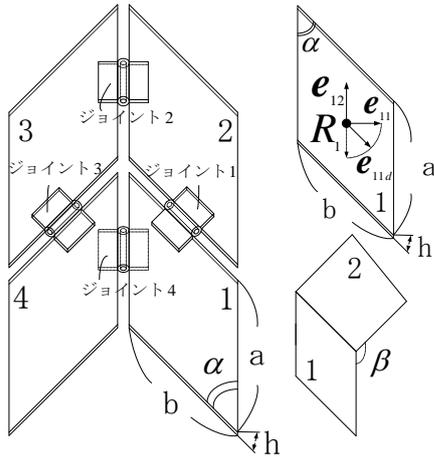


図 2.1 解析モデルと諸元

2.2. ガタの定義

ジョイントには滑らかに展開運動を行わせるためにガタというものがある。図 2.2 左上図より、一般にジョイントは 2 枚の羽板と 1 本の軸から構成されており、羽板穴と穴の中に通す軸の隙間をガタとして定義する。図 2.2 にジョイントの穴と軸のガタの関係図を示す。図 2.2 の左下図より穴と軸と垂直方向の隙間の x 軸方向のガタを g_1 、 z 軸方向のガタを g_3 、図 2.2 の右下図より、 y 軸方向のガタを g_2 とした。

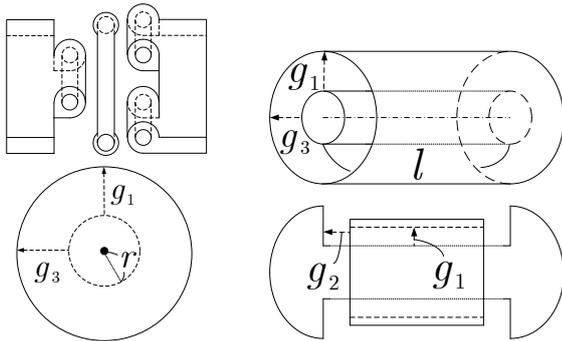


図 2.2 ジョイントとガタの関係図

ガタは並進方向のガタと回転方向のガタの二種類があり式(2.1)~(2.4)で表すことが出来る。 g_1, g_2, g_3 との関係を図 2.3 と式(2.1)~(2.4)に示す。

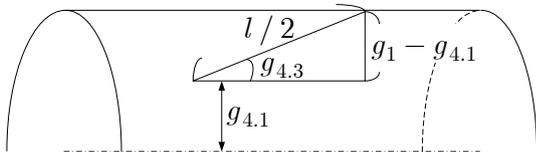


図 2.3 ジョイントの回転、並進ガタの関係図

$$g_{4.1} = \frac{g_1}{2} \quad (2.1)$$

$$g_{4.2} = -\frac{g_2}{2} \quad (2.2)$$

$$g_{4.3} = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2(g_1 - g_{4.1})}{l}\right)^2}}}{2} \quad (2.3)$$

$$g_4 = [g_{4.1} \quad g_{4.2} \quad g_{4.3}] \quad (2.4)$$

パネルの展開運動を考えると、パネルとジョイントに厚みがないと仮定した場合、パネルはガタがなくても折畳むことが可能である。しかしながら、実際の展開パネルでは厚みがあるため、展開運動中にジョイントの軸が図 2.3 のように食い込むことが考えられる。

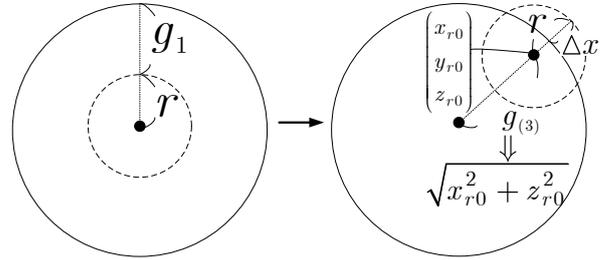


図 2.3 ジョイントが接触する際のガタの関係図

その際の食い込み量に対するガタは式(2.5)~(2.7)と定義する。

$$g(1) = \sqrt{g_1^2 + g_3^2} \quad (2.5)$$

$$g(2) = g_2 \quad (2.6)$$

$$g(3) = \sqrt{x_{r0}^2 + z_{r0}^2} \quad (2.7)$$

以上のようにガタを定義した。また、ジョイントと軸の食い込みについては 2.4 節で述べる。

2.3. ペナルティ法

2.2 節で軸と穴の食い込み量としての定義した。ここでは、物体の接触問題を考える際に用いられるペナルティ法について述べる。物体が接触した際、その物体同士が食い込んだ量がエネルギーとなる。そこで、今回の解析モデルから式(2.8)に定義した。ここで、添字の m はジョイント、 i はガタ、 n はパネルの番号とする。

$$\Pi = \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} c_i^m k_i^m (g_i^m - g_{ref i}^m)^2 \quad (2.8)$$

この時、接触力をパネ力とみなしペナルティ剛性 k_i^m とした。また、接触するためのガタを $g_i^m - g_{ref i}^m$ とし、式(2.9)のように場合分けする。

$$c_i^m = \begin{cases} 1 & \text{if } g_i^m - g_{ref i}^m > 0 \\ 0 & \text{if } g_i^m - g_{ref i}^m \leq 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

ここで、 $g_i^m \leq g_{ref i}^m$ の場合は、接触していないため c_i^m は 0 とみなす。式(2.9)を最急降下法を用いて計算すると、展開運動時のエネルギーを求めることができる。式(2.8)を微分するために、ペナルティ関数をパネルの位置ベクトルとクォータニオンで微分した形を式(2.10)で表す。

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_k^n} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial q_\alpha^n} = 0 \quad (2.10)$$

$$(k=1,2,3 \quad \alpha=1,2,3,4 \quad n=2,3)$$

更に、ペナルティ関数である式(2.8)を各パネルの位置と姿勢を表す行列 z^n (式 2.11)で微分することで、ヒンジが接触したときのエネルギーを求めることができる。ペナルティ関数の微分系を式(2.13)で表す。

$$z^n \equiv [x_1^n \ x_2^n \ x_3^n \ \dot{q}_1^n \ \dot{q}_2^n \ \dot{q}_3^n \ \dot{q}_4^n]^T \quad (2.11)$$

$$\Rightarrow F_p^n \equiv \frac{\partial \Pi}{\partial z_p^n} = 0 \quad (p=1 \sim 7, n=2,3)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z_p^n} = \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^3 c_i^m k_i^m (g_i^m - g_{ref}^m) \frac{\partial g_i^m}{\partial z_p^n} = 0 \quad (2.12)$$

2.4. 最急降下法

最急降下法は、最適化手法の一つである。最急降下法によるパラメータ修正アルゴリズムは式(2.13)の通りである。

$$Z_{n+1} = Z_n - \alpha \left(\frac{\partial \Pi}{\partial Z} \right)_n^T \quad (2.13)$$

最適化手法には一般的に最急降下法の他にニュートン法がよく用いられる。ニュートン法は解析を収束させる際、最急降下法よりも早く数学的に解に近づく方法である。しかしながら、方程式の微分値をステップ毎に計算を行い、微分不連続なので収束性が悪く、二階微分を行わないといけないため非常に煩雑である。最急降下法は、収束性はあまりよくないのだが、収束させる際にエネルギーをパラメータで微分した方向（ローカルでエネルギーが小さい方向）を選択して収束していくため、今回の解析では非常に適していると考えている。また、式(2.13)のパラメータ α を変えると収束性は変わり、ニュートン法と異なり微分は一階なので計算は比較的容易である。

3. 解析結果・考察

2章での理論を基に、プログラムを作成し解析を行った。以下に解析で得られた結果を示す。

ここでの基準モデルは、一辺 $a=b=0.2[m]$ 、角度 $\alpha=45^\circ$ 、厚さ $h=0.01[m]$ 、ガタ $g_{1-3}=1e^{-3}[m]$ 、ジョイントの長さは一辺 $0.1[m]$ の正方形、ジョイントの軸の直径 $6e^{-3}[m]$ 、ペナルティ剛性 $k_i^m=1$ 、取り付け誤差はなしとして解析を行った。今回解析を行ったのは次の4点である。

- (1) パネル展開時の角度と各ジョイントの各軸の最大ガタ
- (2) パネルの厚みとパネル展開運動時のエネルギーの関係
- (3) ジョイントの取り付け誤差とパネル展開運動時のエネルギー
- (4) ガタの大きさとパネル展開運動時のエネルギーの関係

以下に解析結果のグラフを示す。

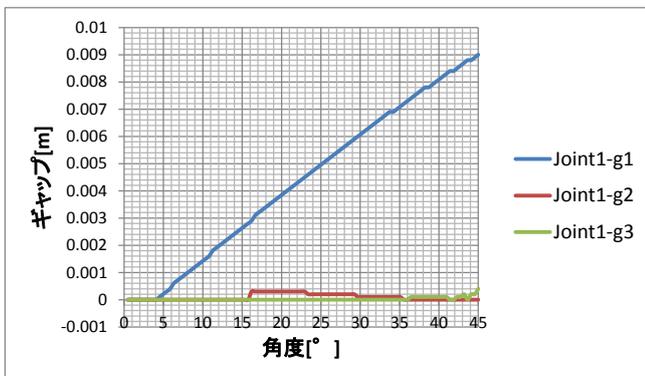


図 3.1 ジョイント 1 と各軸のガタ(対称展開, k=1)

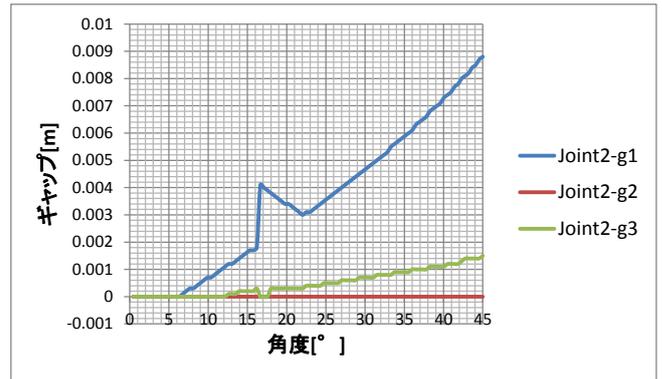


図 3.2 ジョイント 2 と各軸のガタ(対称展開, k=1)

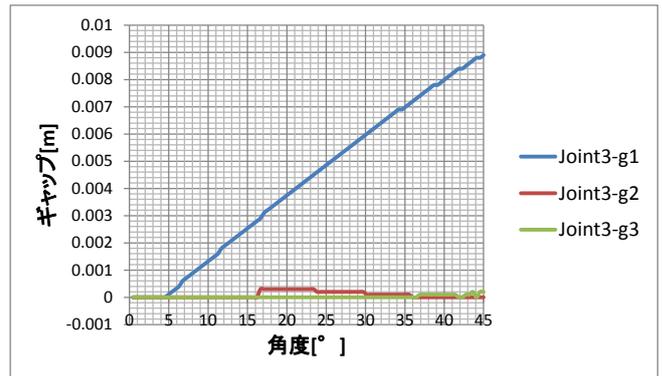


図 3.3 ジョイント 3 と各軸のガタ(対称展開, k=1)

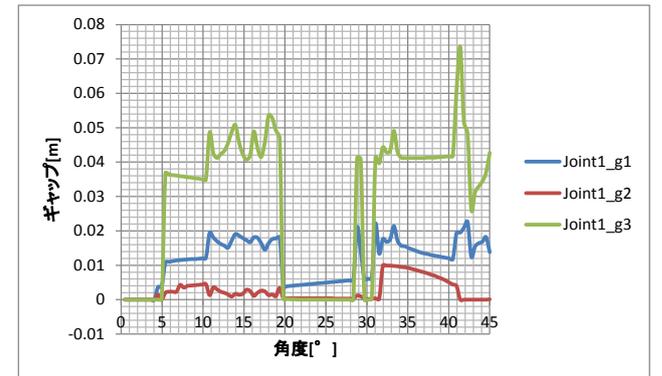


図 3.4 ジョイント 3 と各軸のガタ(非対称展開, k=100)

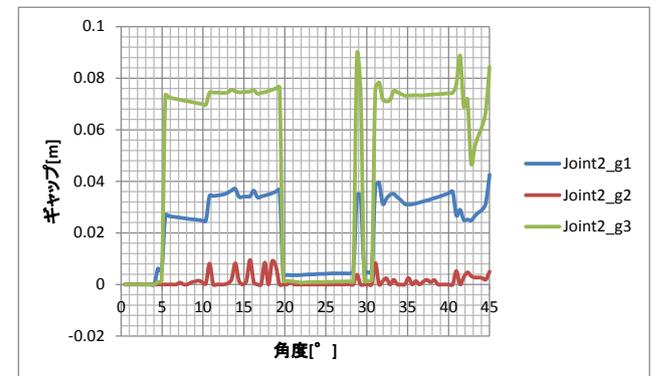


図 3.5 ジョイント 3 と各軸のガタ(非対称展開, k=100)

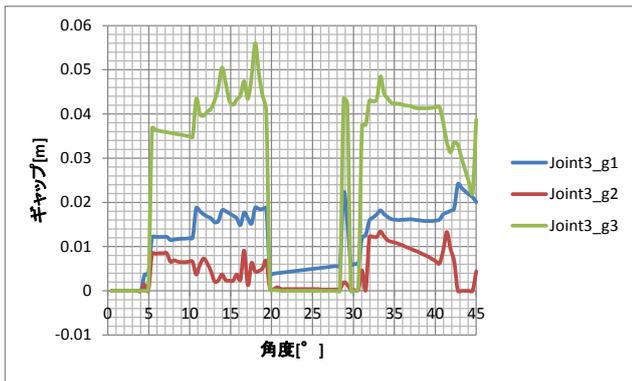


図 3.6 ジョイント 3 と各軸のガタ(非対称展開, k=100)

(1)では、パネル展開運動時にジョイントのガタがどのように変位しているのかを図 3.1~3.3 に示した。図 3.1 と図 3.3 のグラフを見てみると分かるように、ジョイント 1 と 3 は対称に位置する箇所に配置されているため、ジョイント 1,3 のガタは各軸とも一致しているのがわかる。また図 3.2 の Joint3-2 のグラフを見ると、角度 $17^{\circ} \sim 23^{\circ}$ の間でギャップ量が増大しているのがわかる。これは、パネルが展開運動する際に、パネルの厚みにより一番変位する姿勢であることということが分かった。また、図 3.4~3.6 まではペナルティ剛性を大きくすることでペナルティ項を増大させ、非対称展開をさせることができる。

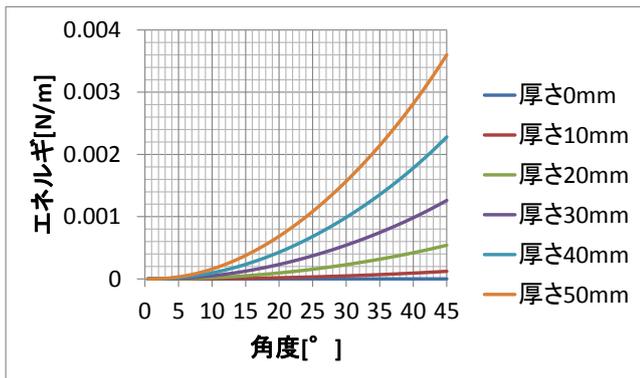


図 3.7 パネルの厚みとエネルギーの関係

(2)では、図 3.7 よりパネルの厚さを変えた場合のパネル展開運動時のエネルギー変化の関係を表したグラフになっている。グラフを見て分かるように、パネルの厚みが増すにつれて、エネルギーが増大していくのがわかる。これは、ジョイント 2,3 が折畳まれる際、ジョイントの間に 2 枚の板が挟み込まれる形となるので、そのため食い込み量が増大してしまい、エネルギーが大きくなると考えられる。

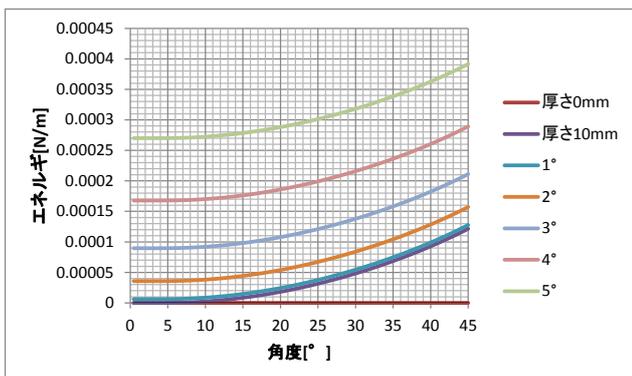


図 3.8 ジョイント取り付け誤差とエネルギーの関係

(3)では、展開運動前、パネルにジョイントを取付ける位置をずらすことで、展開運動の際にエネルギーがどのように変化するかを解析した。結果としては、図 3.8 より、取付角度をずらすことでジョイントの軸と穴が接触するため、ひずみエネルギーが初期の状態から生じ運動が始まることがわかった。

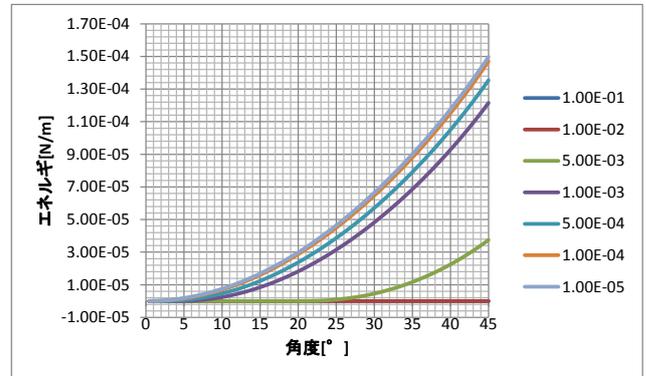


図 3.9 ガタの大きさとエネルギーの関係

(4)では、ガタの大きさを変えた時の運動の比較を行った。図 3.9 から、ガタが $1e^{-2} \leq g_{1-3} \leq 1e^{-3}$ の間でエネルギーが大きく変化するのがわかった。これは、パネルの厚みを $1e^{-2}$ に設定していたため、ヒンジのガタがパネルの厚みより薄くなるのを境界にエネルギーが増大したと考えられる。

以上から、パネルの厚み、取り付け誤差、ガタの大きさといったパネルの展開性を評価するために必要となるパラメータについての解析を行い、そのパラメータとエネルギーの関係を示すことで、エネルギーから各パラメータでの展開性を評価することが出来ると考えている。

4. 結論

ミウラ折りをモデルに、4 枚の板の展開運動モデルを構築する際に連結部のガタのパラメータを定義し、ペナルティ法と最急降下法を用いた解析コードを構築した。その解析コードを用いて、パネルの厚み、取り付け誤差、ガタの大きさが展開性に及ぼす影響を評価し、展開・折畳時にガタがどの程度必要か評価することが出来た。また、汎用的なプログラムとなっているため、天文観測用の高精度アンテナ構造、合成開口レーダ用展開パネル構造や超小型衛星用の太陽電池パドル (SAP) など様々な展開パネルに使用できるものとなっている。

5. 参考文献・出典

- [1] 「ASTRO-H 次期 X 線交際天文衛星」, <http://astro-h.isas.jaxa.jp/>, 2014/02/17
- [2] 「技術試験衛星 VIII 型「きく 8 号」(ETS-VIII)」, http://www.jaxa.jp/projects/sat/ets8/index_j.html, 2014/02/17
- [3] 荒木友太, 斉藤美幸, 磯村哲矢, 吉野達也, 狩野真紀, 宮崎康行 “超小型人工衛星用パネル展開機構の研究開発”, 日本機械学会 2013 年度年次大会 講演集, S192011, 2013 年 9 月, 岡山.
- [4] Y. Miyazaki, Y. Araki, T. Isomura, T. Yoshino, and M. Kano, “A Simple Deployment Mechanism of Panel Structure for Micro Satellite and Its Verification”, 63rd IAC, IAC-12-C2.2.7, Naples, Italy, Oct.2012.
- [5] Tetsuya Isomura, Yuta Araki, Tatsuya Yoshino, Masahiko Yamazaki, Yasuyuki Miyazaki, “Analysis Method of Deployment Mechanism of Panel Structure for Micro Satellite”, 29th ISTS, 2013-c-25, Nagoya, Jun 2013
- [6] Miyazaki Y, Araki Y, Isomura T, Yamazaki M, Yoshino T, and Kano M, Shape accuracy evaluation method of deployment many-body structure that takes into account the uncertainty of the connecting part, SEC' 12, January 2013, pp07