

# 折り紙ソーラーシステム衛星「OS3」

-OS3: Origami Solar System Satellite-

高知工業高等専門学校 電気情報工学科

コバーン マイクジョン 高橋 省吾

指導教員 今井 一雅

## 1. ミッションの背景・目的

CubeSat は極めて小型・軽量であり、一般の人工衛星の打ち上げ費用と比べると非常に安価で、この安さから誰でも人工衛星の開発・打ち上げに参加することを可能にしている。一方、超小型衛星であることから、電力供給に限りがあり省電力化が必須となっている。そこで超小型衛星でも大電力の発電を可能とする、球状ソーラー発電システムを提案し、従来サイエンスミッションに不利であった超小型衛星による本格的なサイエンスミッションを目指す。

我々は、これらの実現に向けたアイデアの一つとして、太陽電池による発電が従来より一桁向上した折り紙ソーラーシステム衛星「OS3」(Origami Solar System Satellite)を提案することにした。そして、サイエンスミッションとして、短波帯における木星電波の広帯域ダイナミックスペクトラムの観測を提案する。これは、

地球の電離層の影響が少ない宇宙での広帯域ダイナミックスペクトラム観測により木星電波放射構造の解明を目的としており、このサイエンスミッションでは、電力容量が必要となる高速 A/D 変換器によるデジタル方式を採用し、そのための大きな電力を折り紙ソーラーシステムにより供給するものである。

## 2. 折り紙の応用について

近年、宇宙開発、医療、デザインなど様々な分野で注目されるようになってきている折り紙であるが、宇宙開発では、新たな探査衛星のモデルとしてソーラーセイルなどに用いられるようになってきている。その他にもソーラーパネル、アンテナの折りたたみに使われ始めている。この折り紙の最大の特徴は、一枚の紙から様々な立体が作ることができることである。このことから世界中の人々たちを魅了する力があり、従来の

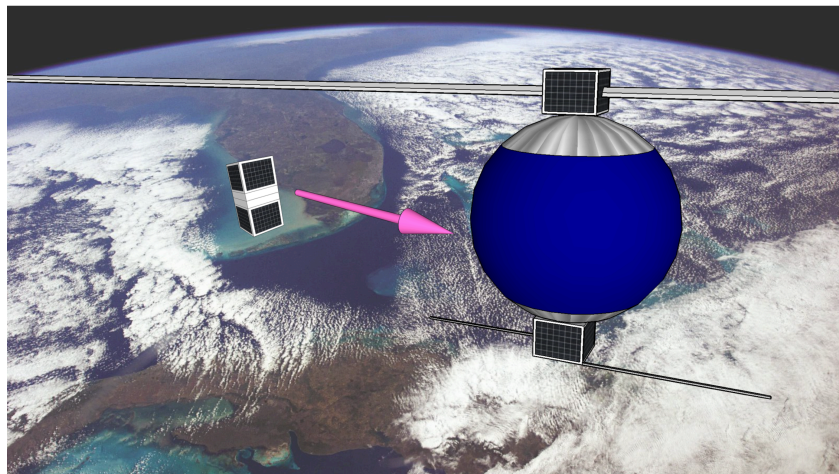


図1 折り紙ソーラーシステム衛星「OS3」のイメージ(背景写真:©NASA)

宇宙開発で重要視されているテクノロジーの面に加え、アートの面が加わりより一層興味深いものとなっている。

### 3. ミッションの概要

OS3 (Origami Solar System Satellite) と呼ぶ、2U サイズの CubeSat を、H-IIA ロケットのピギーバック衛星として宇宙空間へ放出する。その後、折りたたまれた球状ソーラー発電システムの展開を、BMX(バイオメタルヘリックス)を使い、Raspberry Pi Zero の PWM 方式電力制御を用いて行う。その後、アップリンク・ダウンリンク用アンテナと木星電波受信アンテナの展開を行う。

また、搭載した GPS モジュールの正秒パルスを用いて、受信した木星電波のアナログ信号を A/D コンバータによりデジタル信号へ変換する処理を Raspberry Pi Zero で行った後、データを地上局へ送信する。最終的に、地上での同時観測データとの相関解析より、木星電波ダイナミックスpektrum構造の解明を目指し、さらに、球状ソーラー発電システムの確実な展開方法の検証をミッションの目的とする。

### 4. ミッションの設計

#### 4.1 木星電波について

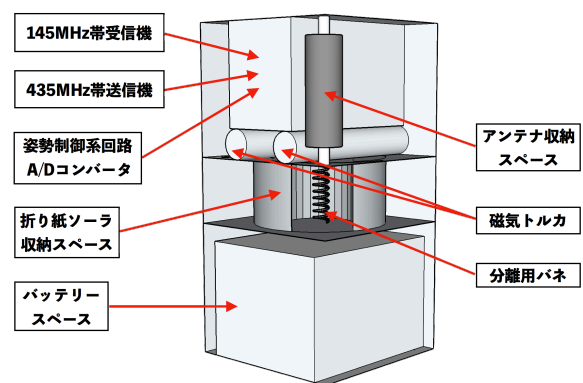
木星電波の数秒オーダの時間変化である L バーストは、地球の電離層によって大きな変調によるものであることがわかっている。宇宙空間では、電離層の影響のない詳細な広帯域のダイナミックスpektrum観測が可能となる。

#### 4.2 衛星本体の性能の検討

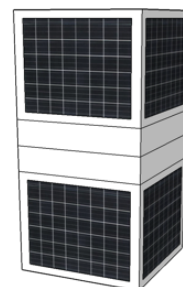
本ミッションの遂行のため我々は、H-IIA ロケットからの放出が容易な 2U サイズの衛星を検討した。図 2 に示すのは衛星本体の全体図である。(a)は各ユニットの衛星内での配置図を示しており、(b)は展開前の様子で(c)はミッション

時における衛星の展開後の様子である。衛星のバッテリーを衛星下部に配置することで後述の重力傾斜トルクとしての機能を果たす。

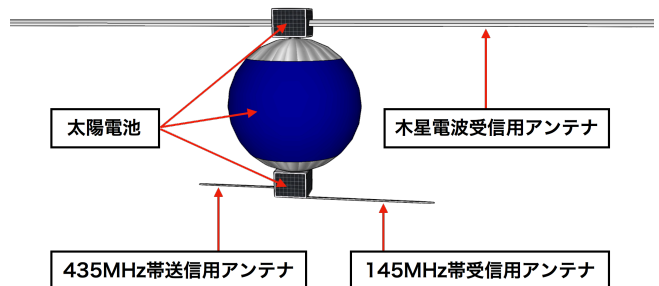
次に、木星から来た電波を木星電波観測用アンテナで受信し、プリアンプによって増幅した後、高速の A/D コンバータでデジタル化し、Raspberry Pi Zero によってダイナミックスpektrum表示処理をした後ファイルに保存する。保存されたデータは地上局に 435MHz 帯の通信バンドにより送られる。



(a) 内部の構造



(b) 展開前の外観図



(c) 展開後の外観図

図 2 衛星の内部構造と外観図

表 1 衛星の性能目標

サイズ	W100×D100×H200[mm](2U)	
	衛星全体	2500g
衛星内訳	電源:	1000g
	通信,データ処理系:	100g
	太陽光パネル:	700g
	構造系:	400g
	ミッション系:	300g
軌道	約700km	
姿勢制御	重力傾斜、磁気トルカ	
主要 ミッション 機器	太陽光パネル、姿勢制御系	
	GPS、通信アンテナ系	
	通信送受信機、データ処理系	
	木星電波受信アンテナ	

### 4.3 球状ソーラー発電システムに用いる折り方について

まず球状ソーラー発電システムを用いる理由であるが、超小型衛星の構体では限られた表面積となり大電力発電が難しく、太陽電池パネルを展開する方式でも、大きな電力発電量を得るのは難しい、そこで今回提案する球状ソーラー発電システムに注目した。

今回、球状の折り紙ソーラーシステムの折り方として球状膜を半径方向に収縮させながら軸方向に折り畳む方法[5]を考えた。図 3 は、折り畳まれた状態から展開するまで示している。

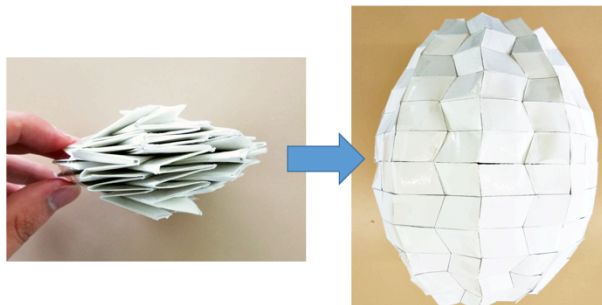


図 3 ソーラーパネルの展開モデル

また、図 3 の球体は図 4 のものを側面に 9 つ接合し製作できる半球を 2 枚、球の赤道面で張り合わせて製作したものである。

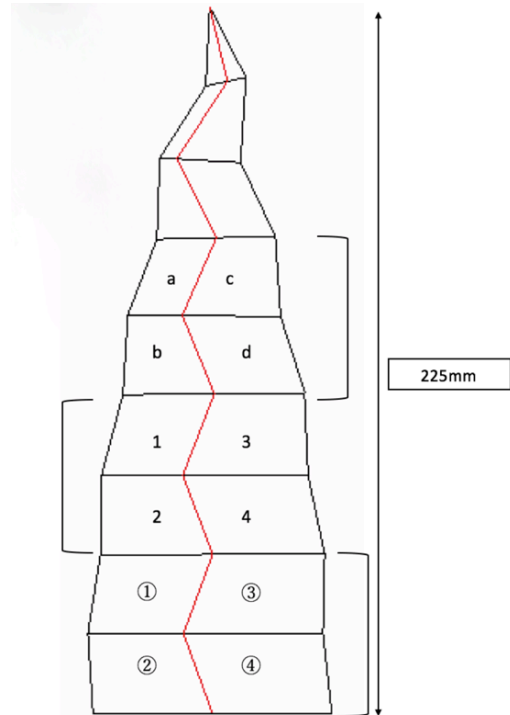


図 4 谷折り (赤線) ©JSME

この折り方は経度方面に 9 分割、緯度方面に 9 分割している。緯度方面への分割が多いほど横幅を取らずに、衛星内に収納することができる。また、中心軸に空間が生まれ(図 5)球状ソーラーの展開での衛星分離を行うバネの収納、二つの衛星間の軸を固定するための軸棒の収納にも利用できる。

この直径 40cm の球体を展開する際、資材の厚み 1mm で高さ 4cm 以下、直径 10cm 以下という、収納性を持つ。(図 4 上から 3 段分は除く)

トータルの発電量は、太陽電池の受光パネル面積が約 10 倍になることから、木星電波の広帯域ダイナミックスペクトラム観測システムに必要な数 W の大電力が供給可能となる。このように、球状ソーラー発電システムは、大電力が必要となるサイエンスミッションにおいて、大変有利になると考えている。



図5 中心軸から見た折り畳まれたソーラーシステム

細かく分割するほどソーラーの1セル分が小さく、太陽電池の製作が難しくなる。実用化に向けては経度方面で6区分、緯度方面で9区分が望ましい。しかし、今回の検証では経度、緯度方面の区分を9区分として検証を行った。またこの太陽電池の制作難易度を下げするために従来の平板セルを使ったものではなく、球状セルを使ったスフェラー®セルを用いた太陽電池にすることにより自由な形状のものを構築できる。

実際には、図4の上から3段分は展開させるための機構を組み込むのが難しく、図6で示すように、黄色の球面の柔軟な金属棒(三本交わっている黒棒)を三本上面、下面に用い、軸に固定させる方法をとる。折りたたむ際は、回転させながら軸方向へ収納することになる。

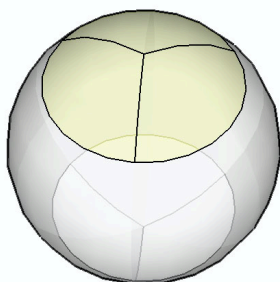


図6 球状ソーラーシステムと軸の固定方法

#### 4.4 スフェラー®セルについて

スフェラー®社によって開発されたスフェラー®セル[7]は、受光面を球状にすることにより平板型に比べて約3倍の光を取り込める。粒状セ

ルを単位として設計しているため、従来の宇宙用太陽電池の決められたサイズ、形状に縛られる必要がなくなり、自由な形状のソーラーパネルを作ることが可能である。また、実際にスフェラー®セルを用いた12直列1並列型のスフェラー®アレイを宇宙太陽電池として利用する実証実験[8]が九州工業大学の衛星で行われている。表2にその特性を示す。九州工業大学の衛星はこれを58個直列(696セル)につないで300V以上の発電を実現している。

表2 12セル直列スフェラー®アレイ

開放電圧	7.27V
短絡電圧	2.3mA
最大出力	13.5mW

今回は、このスフェラー®セルを以下のようにメッシュ状に配置したものを採用することを考えており、電極の取り方を図7に示す。

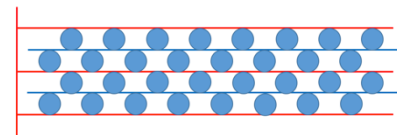


図7 スフェラー®セルの配置及び電極取り方

最初にも述べたようにスフェラー®セルのメリットとして受光面が球状であることから、平板型に比べて約3倍の光を取り込むことが可能である、そこで図8のように、ソーラーパネルを貼り付ける支材の面にメッキ加工を行い効率よく光がセルに取り込まれる仕組みも導入することも考えた。

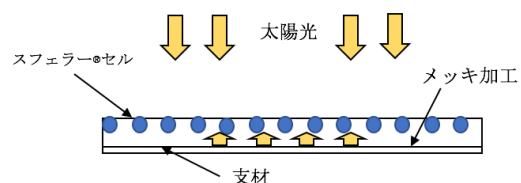


図8 反射光の利用



#### 4.5 BMX について

我々は、BMX(バイオメタルヘリックス)[3]を用いて折り紙ソーラーパネルの展開を考えた。

BMX は、筋肉のよう動きをする新しいアクチュエータで、伸ばした BMX は電流や熱で力強く元の長さへと縮む。収縮する際の力は伸ばす時よりさらに大きな力を発生し、縮んだ時の長さの 200%近い大きな長さ変化を得られる。以下に BMX の物性値を示す。今回のソーラーパネル展開に必要な BMX の縮み量を $\Delta\alpha$ とする図 12 の構造より次式を得る。

$$\Delta\alpha = 2t$$

ここで  $t$ [mm]はソーラーパネルの厚みである。しかし BMX は BMF をコイル状に巻いたものでそれを引き延ばして使う、そこに電流を流すことで引き延ばした分が縮む。そこで必要となる BMX の長さは図 10 の実験で 5cm のものを 2 つ、4cm のものを 1 つ用いて実験した。(縮んだ状態)

表 3 BMX の物性値

標準コイル径: $D\phi$ mm	0.62
実用発生力: gf	20~40
運動変位(長さ変化): %	200
標準駆動電流: mA	200~300
標準抵抗値: $\Omega/m$	400

#### 4.6 球状ソーラー発電システムの展開

宇宙空間へ放出され、まず上部、下部との分離を、図 9 のようにテグスをニクロム線の発生熱で切断する。

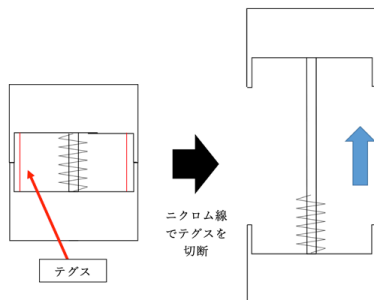


図 9 分離イメージ

分離の際、軸棒が 0.05m から 0.44m に伸び、軸方向へ球状ソーラーが引き延ばされる。その後、Raspberry Pi Zero の PWM 方式電力制御により BMX の収縮を利用したソーラーパネルの展開を行う。以下に機構の仕組みを示す。

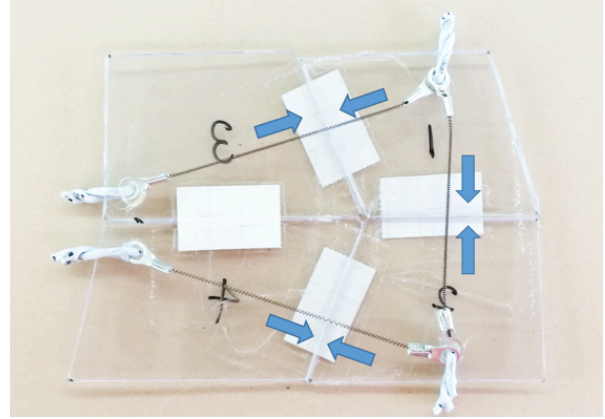


図 10 BMX 設置位置(軸側から見る)

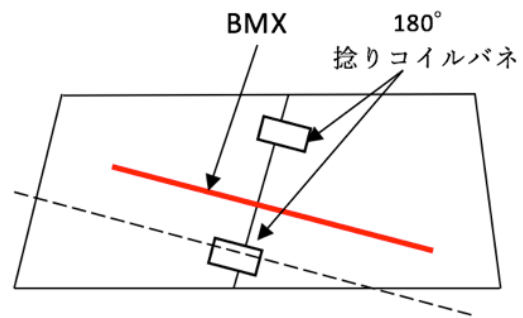


図 11 図 4 の 2, 4 パネル部(軸側から見る)



図 12 図 11 の破線断面図

この機構は図 4 の 1, 2, 3, 4 の例と同様に、①, ②, ③, ④、a, b, c, d で使われる。これは、軸側(太陽光の当たらない面側)にのみ組み込むことで直射日光の影響を受けないものになっている。その他の折り曲げ部分では、捻りコイルバネ、BMX は使用しない。

また以下に、単三電池を直列に 3 個接続した時の展開の動作を示す。開ききるまでの時間は、4

秒以内であることがわかった。実際に宇宙空間で展開する時は、急な展開は良くないので、PWM方式の電力制御でBMXに流れる電流を流す時間を短く、流す間隔を長くすることで、時間をかけた展開の制御が可能である。

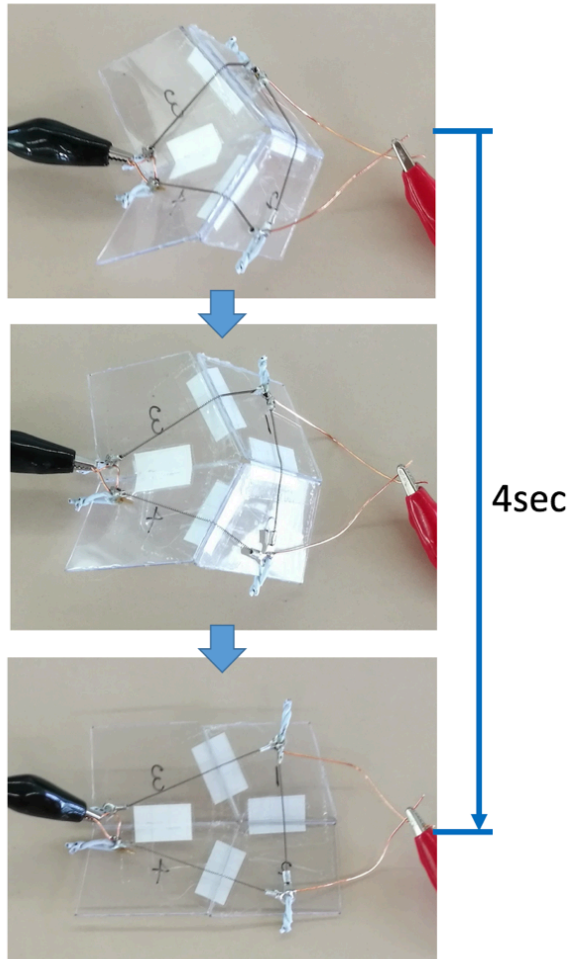


図 13 ソーラーパネルの展開の様子

#### 4.7 電源系について

衛星「OS3」は、下部分を単三型リチウムイオンバッテリーの収納場所として確保してソーラーパネルにより得られる電力を、電池充電コントローラICでCVモードとPPTモードでの制御を通して安全にリチウムイオンバッテリーに充電する。また、同時にバッテリーから各ユニットに電源を供給する。図2(c)は本衛星の外観図である。衛星側面に4つ上下部に2つそれぞれ3接合太陽電池を取り付ける。これによ

り、最低限の必要となる発電が行え、それに加え、今回提案する、直径40cmの球状ソーラー発電システムで本体側面、衛星構体側面の太陽電池パネルだけの発電の6Wに比べて、約5倍程度の35Wの発電が可能となる。また今後のスフェラーセルの発電効率(現在10~15%)の向上により発電効率30%以上を実現することができるとOS3本体側面の発電能力に対して10倍以上の発電を実現できる。

#### 4.8 姿勢制御システム

本ミッションで使用する衛星は太陽電池を展開した際、上部、下部の衛星の重心が0.44mの距離を持つことや、高度700kmでの運用を考えているので地磁気トルクを十分に利用しパッシブな制御系として、重力傾斜トルクと磁気トルカを用いることを提案する。また、アンテナの展開時の姿勢変動の発生を抑えるため上部衛星内での質量を移動させることも考慮する。本ミッションで取り扱う重力傾斜トルクは、衛星の質量を偏心させることで、重力傾斜トルクを得る方法である。不安定な姿勢になった場合は、搭載する磁気トルカを用いて安定を図る。(図14で示す $m_B$ (1.650kg)と $m_A$ (0.850kg)で作られる軸が常に $m_B$ を地球側になる姿勢に制御を行う)

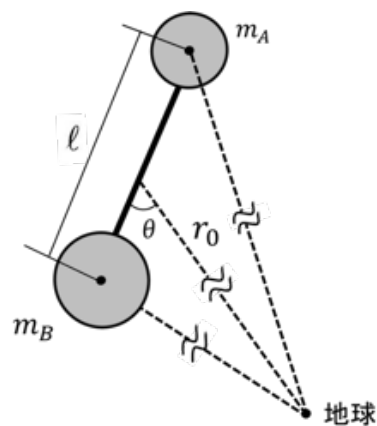


図 14 機体のモデル化

#### 4.9 木星電波観測用アンテナの展開機構

図 15 は、アンテナ展開時のイメージ図を示す。

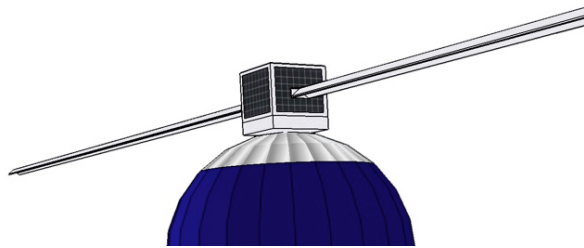


図 15 アンテナ展開時イメージ

本ミッションは、20MHz の木星電波の観測をするために、1 本 3.6m 全長 7.2m のダイポールアンテナを衛星上部で展開する必要がある。

図 16, 17 に衛星のブーム展開の様子を示す。これは NASA のエイムズ研究所が開発した NanoSail-D2[6] のソーラーセイルの展開用ブームに用いられたものでブームとしては最もシンプルな構造のものである。この方式を木星電波観測用のアンテナとして利用する。

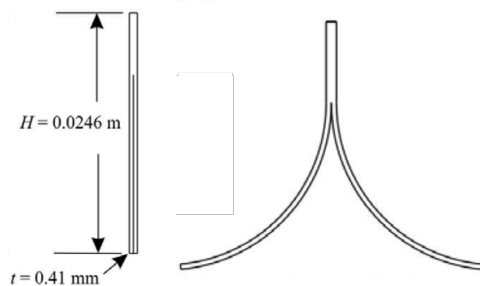


図 16 アンテナの展開前(左)、展開後(右) ©NASA

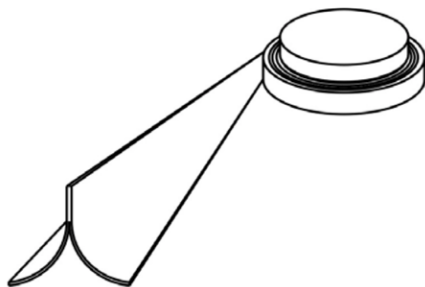


図 17 アンテナ展開の様子 ©NASA

#### 5. まとめ

本ミッションは、従来小型衛星では行えなかったサイエンスミッションを、折り紙を用いた球状ソーラー発電システムにより大電力発電を可能とするものである。これが実現できると、2U サイズのバス機器として、2U 以上の CubeSat に利用することが可能となる、さらに本ミッションで考えているソーラー展開で BMX (バイオメタルヘリックス) を用いるのは初の試みとなり、新しい超小型衛星のモデルとしての波及効果が期待できる。これらは、CubeSat によるサイエンスミッション実現の突破口を切り開く重要な技術要素であると考えている。

#### 6. 参考資料・参考ウェブサイト

- [1] 今井一雅: 木星から地球に届く謎の電波を探る, 電波技術協会報 FORN 285, pp. 30-33 (2012)
- [2] 宮崎康行: 人工衛星を作る, オーム社
- [3] 『BioMetal』  
<http://www.toki.co.jp/biometal/products/bmx/bmx.php>
- [4] 『Performance Validation of the Triangular Rollable and Collapsible Mast』  
<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1193&context=smallsat>
- [5] 『球状膜を半径方向に収縮させながら軸方向に折り畳む方法の開発』  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/transjsme/80/814/80\\_2014dr0170/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/transjsme/80/814/80_2014dr0170/_pdf)
- [6] 『NanoSail-D2』  
<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/n/nanosail-d2>
- [7] 『SPHELAR POWER』 <http://sphelarpower.jp>
- [8] 『超小型人工衛星「鳳龍四号」の放電試験システム開発に関する研究』  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jceek/2014/0/2014\\_174/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jceek/2014/0/2014_174/_pdf)