

B07 薄肉開断面ブームの断面形状と座屈特性について

日野将太, 勝又暢久, 樋口健 (室蘭工業大学)

Shota Hino, Nobuhisa Katsumata, Ken Higuchi (Muroran Institute of Technology)

1. 背景・目的

高度化する宇宙ミッションの要求に応えるため、宇宙構造物の更なる大型化・高精度化が求められている。その要求に応えるためには、より軽量で剛性・強度が高く、高い収納効率と単純な伸展機構を有する宇宙伸展構造物（伸展ブーム）が必要になる。先行研究では、様々な断面形状を有する伸展ブームが研究・開発されており、閉断面を有する伸展ブーム（Double Omega 断面^[1]、円形断面^[2]、波型断面^[3]など）や、開断面を有する伸展ブーム（STEM Boom^[4]、Bi-STEM^[4]、TRAC Boom^[5,6,7]など）、また開断面伸展ブームを組み合わせ、被覆などで疑似的に閉断面化した疑似閉断面を有する伸展ブーム（BCON Boom^[8,9,10]など）が存在する。曲げ剛性、ねじり剛性や収納効率に対して、各断面形状はメリット・デメリットを有しているが、その中でも人型の開断面形状を有する伸展ブームである TRAC Boom (Fig. 1 (b)) が海外では近年注目されている。ねじり剛性において不利とされている開断面形状で設計されている点やその断面形状に着目し、TRAC Boom とは異なる開断面形状でよりよい設計が行えるのではないかと考えた。

そこで本研究では、Fig. 1 (a)に示す図心とせん断中心を一致させた X 型の開断面形状を有する伸展ブーム（以下、X Boom）を提案し、座屈特性について TRAC Boom と比較した。座屈特性においては、X Boom と TRAC Boom における、1. 断面形状、2. ブーム長、3. 板厚をパラメータに解析モデルを複数個作成し、曲げ方向と軸圧縮方向の荷重に対する座屈モードと座屈荷重を比較した。解析モデルが複数個あることから、計算コストの低い線形固有値座屈解析で計算を行った。X Boom と TRAC Boom の各断面形状における座屈モードと座屈荷重を比較することで座屈特性を分類し、開断面伸展ブームを設計する際の断面形状について知見を得ることを目的とした。

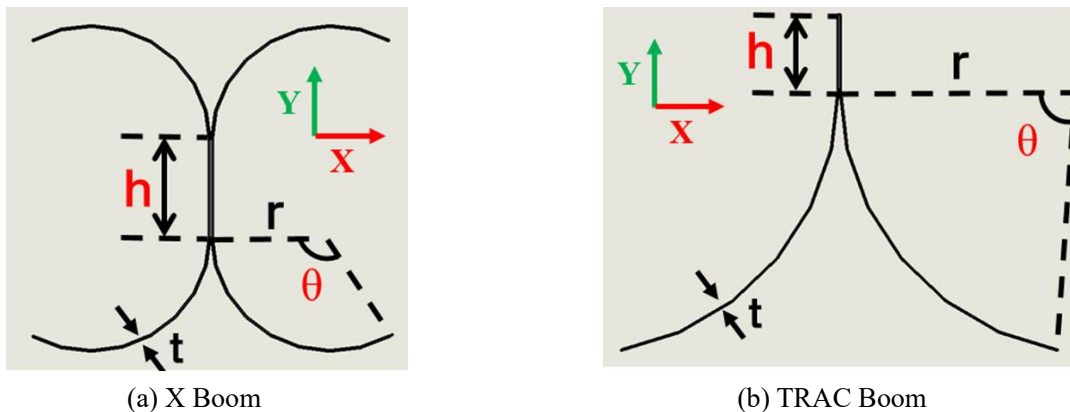


Fig.1 解析モデル断面形状

2. 線形固有値座屈解析

2.1 解析モデルの断面形状

X Boom と TRAC Boom の断面形状が座屈特性に与える影響を比較する上での前提条件として、板厚

が同一の場合の質量を一致させた。より具体的には、すべての断面形状において線長の合計を 60 mm と一定にした。その前提条件のもと、Fig. 1 に示す 4 つのパラメータ (r : 円弧半径, θ : 中心角度, t : 板厚, h : 断面の直線部分の長さ) のうち、 θ と h を変化させることでそれぞれ 6 種類の断面形状を作成した。6 種類の断面形状における θ と h の値を Table 1 に、また得られた各断面形状を Fig. 2 に示す。

X Boom と TRAC Boom の 6 種類の断面形状に対して、3 パターンのブーム長 (1, 5, 10 m) の場合と、3 パターンの板厚 (0.01, 0.1, 1 mm) の場合の解析モデルを作成して計算した。

Table 1 X Boom と TRAC Boom の各種断面形状におけるパラメータ

モデルNo.		1	2	3	4	5	6
X Boom	h [mm]	5.0	5.0	5.0	10	10	10
	θ [deg]	80	119	159	64	95	127
	r [mm]	9.0	6.0	4.5	9.0	6.0	4.5

モデルNo.		7	8	9	10	11	12
TRAC Boom	h [mm]	5.0	5.0	5.0	10	10	10
	θ [deg]	80	119	159	64	95	127
	r [mm]	18	12	9.0	18	12	9.0

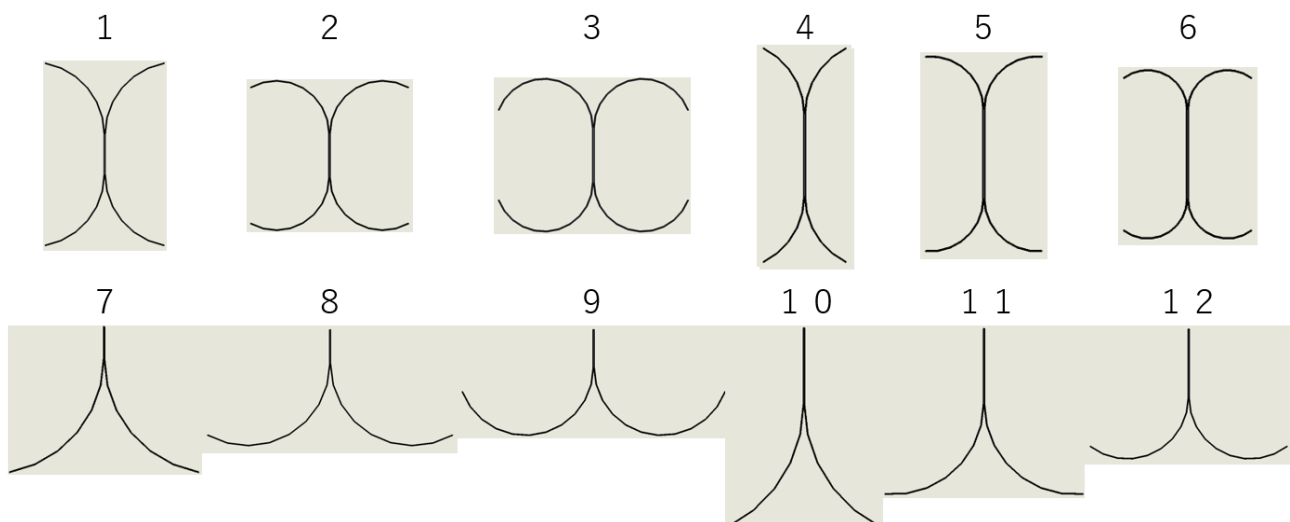


Fig. 2 X Boom と TRAC Boom の解析モデルにおける各種断面形状

2.2 線形固有値座屈解析における各種条件

解析は、汎用有限要素解析ソフト ANSYS Workbench Mechanical を用いて計算した。メッシュサイズは、ブーム長が 1m の場合に 1mm, 5m の場合に 2mm, 10m の場合に 2.5mm の正方形メッシュとし、低次元シェル要素を用いた。材料は、構造用鋼の物性値 (E : 200 GPa, ν : 0.3, ρ : 7850 kg/m³) を適用して計算した。

解析モデルの概要を Fig. 3 に示す。拘束条件は、Fig. 3 の根本部断面の全接点を 6 自由度拘束した。また荷重を作用させる先端部においては、断面形状が保持されるように図心と先端部断面の全接点を剛体バー要素で結合した。

荷重は、先端部断面の図心に集中荷重として負荷した。荷重方向は、TRAC Boom の図心とせん断中心の差異の影響を考慮し、Y 方向 (曲げ) と Z 方向 (圧縮) に負荷した。

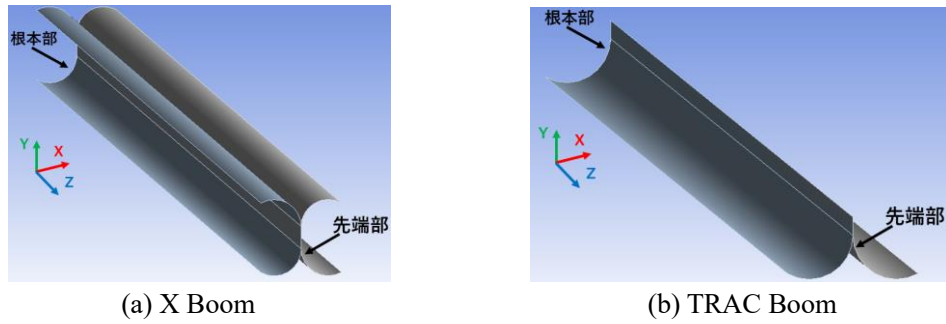
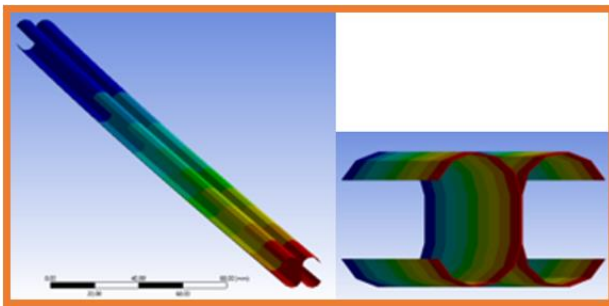


Fig. 3 解析モデルの概要

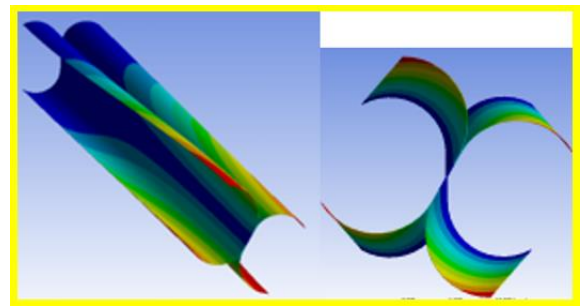
3. 線形固有値座屈解析における座屈モードと座屈荷重の結果

線形固有値座屈解析で得られた一次座屈モードを Fig. 4 に分類する. なお, 以降の座屈荷重をまとめた Table 2, 3, 5 において, セル内を下記の色で塗りつぶすことで座屈モード进行分类する.

- Fig. 4 (a)の曲げモードで座屈した場合: オレンジ色
- Fig. 4 (b)のねじりモードで座屈した場合: 黄色
- Fig. 4 (c)の局所座屈モードで座屈した場合: 水色
- Fig. 4 (d)の曲げ・ねじり連成モードで座屈した場合: 黄緑色



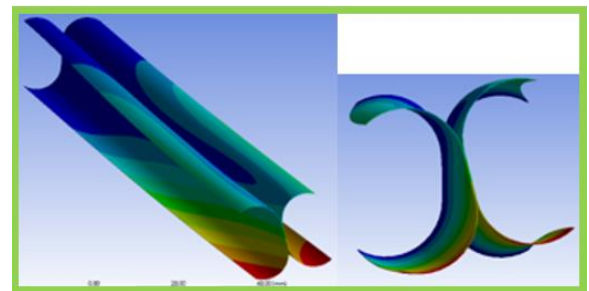
(a) 曲げモード



(b) ねじりモード



(c) 局所座屈モード



(d) 曲げ・ねじり連成モード

Fig. 4 一次座屈モードの分類

3.1 板厚が一定の場合における座屈モードと座屈荷重の関係

0.1 mm の板厚に対し, 断面形状とブーム長を変化させた場合の座屈モードと座屈荷重の関係を Table 2 に示す. 同じブーム長で両 Boom の座屈荷重を比較した際, 荷重値が大きい方を赤字とした.

3.1.1 ブーム長と座屈モードの関係 Y 方向に荷重を負荷した場合, X Boom のブーム長が 1m から 10m の範囲では, ブーム長によらず曲げ・ねじり連成モードとなった. TRAC Boom は, 1m の短い場合にねじりや局所座屈モードとなるが, 5m や 10m と長くなった場合には全て曲げ・ねじり連成モードになっ

た.

Table 2 各断面形状における座屈モードと座屈荷重の関係

(a) Y方向に荷重を負荷した場合の座屈荷重 [N]

断面形状	ブーム長 [m]	h:5[mm] θ:80[deg]	h:5[mm] θ:119[deg]	h:5[mm] θ:159[deg]	h:10[mm] θ:64[deg]	h:10[mm] θ:95[deg]	h:10[mm] θ:127[deg]
X	1	1.6	2.6	3.1	-0.86	-1.4	-1.9
	5	-0.032	-0.044	-0.049	-0.021	-0.030	-0.036
	10	-0.0074	-0.0096	-0.0106	-0.0077	0.0071	-0.0078
TRAC	1	-1.0	-1.9	1.8	1.0	1.3	1.1
	5	-0.046	-0.062	0.089	0.038	0.050	0.056
	10	-0.012	-0.016	-0.020	0.0090	0.013	0.014

(b) Z方向に荷重を負荷した場合の座屈荷重 [N]

断面形状	ブーム長 [m]	h:5[mm] θ:80[deg]	h:5[mm] θ:119[deg]	h:5[mm] θ:159[deg]	h:10[mm] θ:64[deg]	h:10[mm] θ:95[deg]	h:10[mm] θ:127[deg]
X	1	18	33	46	11	18	24
	5	1.2	1.5	1.7	0.4	0.8	1.1
	10	0.3	0.5	0.57	0.11	0.2	0.27
TRAC	1	8	12.6	19.6	6.3	7.6	9.1
	5	1.1	1.3	1.5	1.1	1.3	1.4
	10	0.52	0.59	0.47	0.43	0.59	0.62

Z方向に荷重を負荷した場合、X Boomは1mの短いブーム長のときねじりモード、5,10mと長い場合は曲げモードになった。TRAC Boomは全体的にねじりモードとなったが、10mと長くなった場合に、一部曲げモードも得られた。

3.1.2 hと座屈モードの関係 断面の直線部分が大きくなると、Y方向、Z方向どちらに荷重を負荷した場合でも、両Boomとも座屈荷重が低下した。これは、hの増加が曲げ剛性に寄与しないX方向に曲げ座屈が生じたためと考えられる。

3.1.3 θと座屈モードの関係 Y方向に荷重を負荷した場合、X Boomはθの増加に対応して座屈荷重も増加した。その際の座屈モードは全て曲げ・ねじり連成モードとなった。TRAC Boomはθが小さい値の場合にねじりか曲げ・ねじり連成モードとなり、θが増加すると局所座屈モードになった。座屈荷重は、局所座屈モードにおいてθの増加とともに減少し、ねじりモードと曲げ・ねじり連成モードにおいてはθの増加と共に増加した。

Z方向に荷重を負荷した場合、X Boomはθが小さい場合に曲げモード、θが大きくなるにつれてねじりモードとなった。またその際の座屈荷重は、どのモードにおいてもθの増加と共に増加した。TRAC Boomはθに関係なく全体的にねじりモードとなり、座屈荷重は例外を除くとθの増加とともに増加した。例外は、曲げモードで座屈した時に生じた。

3.1.4 座屈荷重の比較 Y方向に荷重を負荷した場合、X Boomの曲げ・ねじり連成モードに対してTRAC Boomが異なる座屈モードの場合、X Boomの方が高い座屈強度となった。一方、両者の座屈モードが同一の場合は、TRAC Boomの方が高い座屈強度となった。また、ブーム長が短い場合はX Boomの方が、ブーム長が長い場合はTRAC Boomの方が、高い座屈強度を示した。

Z方向に荷重を負荷した場合、両者がねじりモードの場合にX Boomの方が高い座屈強度となった。

一方で、両者の座屈モードが異なる場合には、一部の例外を除き、TRAC Boom の方が高い座屈強度となった。また、ブーム長に対する座屈強度は、Y 方向荷重時と同様の結果となった。

3.2 特定の断面形状に対して板厚とブーム長を変化させた場合の座屈モードと座屈荷重の関係

直線部 h の長さが等しく、 θ に差異がある断面形状 (Fig. 2 のモデル番号 1, 3, 7, 9) に対して、板厚とブーム長を変化させた場合の解析結果を Table 3 に示す。表中の赤字の意味は、Table 2 と同様である。

Table 3 特定の断面形状に対して板厚とブーム長が座屈モードと座屈荷重に与える影響

(a) Y 方向に荷重を负荷した場合の座屈荷重[N]

断面形状	ブーム長 [m]	h:5[mm], θ :80[deg]			h:5[mm], θ :159[deg]		
		板厚					
		0.01mm	0.1mm	1mm	0.01mm	0.1mm	1mm
X	1	0.049	1.6	72	0.076	3.1	91
	5	-0.0038	-0.032	-2.6	0.0023	-0.049	3.2
	10	0.00073	-0.0074	-0.65	0.00048	-0.011	-0.78
TRAC	1	0.0047	-1.1	-114	0.0025	1.8	-181
	5	-0.00066	-0.046	-5	0.00057	0.090	-6.8
	10	-0.00011	-0.012	-1.3	0.00032	-0.020	-1.7

(b) Z 方向に荷重を负荷した場合の座屈荷重[N]

断面形状	ブーム長 [m]	h:5[mm], θ :80[deg]			h:5[mm], θ :159[deg]		
		板厚					
		0.01mm	0.1mm	1mm	0.01mm	0.1mm	1mm
X	1	2.2	18.4	334	5.8	45.6	560
	5	0.017	1.2	13	0.038	1.73	22
	10	0.0024	0.302	3.4	0.0043	0.573	5.5
TRAC	1	0.42	8.02	1236	1.2	19.6	435
	5	0.0058	1.15	50	0.019	1.52	17
	10	0.0013	0.52	13	0.0028	0.467	4.3

3.2.1 板厚・ブーム長と座屈モードの関係 横軸を板厚、縦軸をブーム長とした場合に、各パラメータの変化が座屈モードに与える影響を示した模式図を Fig. 5 に示す。Y 方向に荷重を负荷した場合には、板厚の増加とともに局所座屈→ねじり→曲げ・ねじり連成モードの順で変化した。ブーム長においても同様の傾向となった。Z 方向に荷重を负荷した場合には、板厚の増加とともに局所座屈→ねじり→曲げの順で変化した。ブーム長に対する座屈モードの変化は、板厚の変化に比べると影響が小さかった。

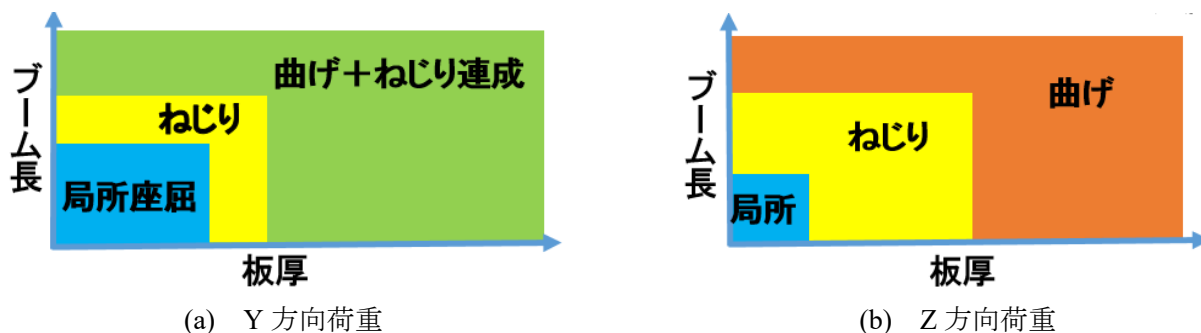


Fig.5 板厚とブーム長が座屈モードに与える影響

3.2.2 座屈荷重の比較 Y方向に荷重を負荷した場合には、板厚が薄く、局所座屈モードやねじりモードが支配的な場合において X Boom の方が高い座屈強度を示した。一方、板厚が厚く、曲げ・ねじり連成モードが支配的な場合においては、TRAC Boom の方が高い座屈強度を示した。

Z方向に荷重を負荷した場合には、板厚が薄く、局所座屈モードやねじりモードが支配的な場合において X Boom の方が高い座屈強度を示し、板厚が厚く、曲げモードが支配的な場合においては各断面形状で傾向が異なった。

3.2.3 断面特性と座屈強度の関係 Table 4 に、板厚が 1mm の場合における X Boom と TRAC Boom の各断面形状における断面特性を示す。Table 3 (b)において、板厚が 1mm で両者が曲げモードの場合においては、各断面形状に対する座屈強度の大小と断面二次モーメントが小さい軸方向の値の大小が一致した。このことから、X Boom と TRAC Boom の座屈モードが曲げモードで一致した場合においては、分かりやすい関係性があることが分かった。一方、Table 3 (b)において両者がねじりモードの場合においては、曲げモード時と異なり、単純な断面特性の大小で座屈強度を推測できないことが分かった。

Table 4 各断面形状の断面特性 [mm⁴]

モデル寸法		h:5, θ:80	h:5, θ:159
X	ly	637	1015
	lx	2993	1325
	lp	3631	2340
TRAC	ly	2465	4409
	lx	2699	865
	lp	5165	5274

4. 円形開断面を有する STEM Boom との比較

3.2.3 の曲げモードと断面特性の関係から、X Boom や TRAC Boom より断面特性の優れる STEM Boom と比較することで、座屈強度に関して考察した。STEM Boom の断面形状は、解析条件を一致させるために、線長が 60mm で 1deg の切り込みがある円形開断面とした。ブーム長、拘束条件も同様にした上で、Z方向に荷重を負荷した場合のみの線形固有値座屈解析を行った。Table 5 にその結果をまとめた。

Table 5 STEM Boom の座屈荷重 [N] (Z方向)

	ブーム長 [m]	板厚		
		0.01 [mm]	0.1 [mm]	1 [mm]
STEM	1	14	136	1358
	5	0.54	5.4	54
	10	0.13	1.34	13

Table 6 各断面の最小断面二次モーメント

断面形状	h:5, θ:80	h:5, θ:159
X	637	1015
TRAC	2465	865
STEM	2762	2762

STEM Boom は、ここで取り扱ったすべてのブーム長・板厚において曲げモードで座屈した。同じ曲げモードである板厚 1mm の場合の X Boom と TRAC Boom と比較した場合においては、すべての場合において STEM Boom が高い座屈強度を示した。Table 6 に X, TRAC, STEM Boom の断面特性をまとめたが、この結果は 3.2.3 の考察時と同じ結果である。また、h: 5mm, θ: 80deg の TRAC Boom においては、断面二次モーメントの最小値が 2465mm⁴ と STEM Boom の 2762mm⁴ と同程度なため、各ブーム長において STEM Boom と同程度の座屈強度を示した。

5. 結論

開断面伸張ブームを設計する際の断面形状について指針を得ることを目的に、X 型の断面形状を有す

る X Boom と人型の断面形状を有する TRAC Boom の線形固有値座屈解析を行い、座屈モードと座屈荷重の関係をまとめた。3.1.4, 3.2.2 のまとめから、Y 方向、Z 方向の両荷重方向に対して、X Boom は「薄肉・短い」場合に、TRAC Boom は「肉厚・長い」場合に優位な座屈強度となる傾向を得た。

また 3.2.3 と 4 のまとめから、Z 方向に荷重を負荷し、X, TRAC, STEM Boom の座屈モードが曲げの場合に限り、座屈強度の優劣が断面特性の比較のみで推定できることが分かった。一方、Z 方向荷重に対してねじりモードなどの曲げとは異なるモードで座屈が生じる場合には、各断面形状における数値解析結果の比較が必要である。

参考文献

- [1] Joachim, B., Marco, S. and Martin, W., “Ultralight Deployable Booms for Solar Sails and Other Large Gossamer Structures in Space”, *Acta Astronautica* 68 (2011), pp. 984–992.
- [2] 古谷寛, 他, 円筒 CFRP ブームを用いた巻き付け型展開膜構造の検討, 第 29 回宇宙構造・材料シンポジウム, A4, 2013.
- [3] 岡田秀明, 古谷寛, 波形閉断面を有する伸展ブームの提案と力学特性の検討, 第 33 回宇宙構造・材料シンポジウム, B07, 2017.
- [4] George G. Herzl, etc., “Tubular Spacecraft Booms (Extendible, Reel Stored)”, NASA SP-8065, 1971.
- [5] Christophe Leclerc, Lee Wilson, Miguel A. Bessa and Sergio Pellegrino, “Characterization of Ultra-Thin Composite Triangular Rollable and Collapsible Booms”, AIAA SciTech Forum, AIAA 2017-0172.
- [6] Murphey, T. W., Banik J., “Triangular rollable and collapsible boom”, US Patent 7,895,795 Mar. 1 2011.
- [7] Banik J. and Murphey T. W., “Performance Validation of the Triangular Rollable and Collapsible Mast”, Proceedings of the 24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, UT, 2010.
- [8] 渡邊秋人, 伊藤裕明, 堀利行, 組紐を被覆した伸展構造物の検討, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2O07, 2012.
- [9] 渡邊秋人, 堀利行, 伊藤裕明, 組紐被覆ブームの軽量化検討, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3M15, 2013.
- [10] 宮崎康行, 他, コンベックステープの巻き付け時の変形の理論解, 第29回宇宙構造・材料シンポジウム, A5, 2013.