

小型衛星用自己伸展ブームの比較評価

Evaluation of Self-Extensible Booms for Small Satellite

宮崎研究室

Miyazaki Laboratory

小篠隆太郎

Koshino Ryutaro

Nowadays, various types of booms, especially self-extensible booms, have been proposed for small satellite missions. However, there is no clear answer as to which boom is appropriate for which mission. Therefore, in this study, we will grasp the characteristics of the self-extending booms and evaluate the advantage of each evaluation item. Since there are no clear evaluation items in the references alone, the optimum results are derived, including the author's subjectivity. On top of that, we are planning to set the evaluation criteria for boom, which will be studied further in the future.

1. 序論

1.1 研究背景

1960年代以降、宇宙空間で自己伸展可能なBoomは多く開発・運用されてきた。その用途は様々であり、無線アンテナやソーラーセイルなど多岐に渡る。そして近年では、多様化したミッションに合わせるように小型衛星、延いてはBoomも著しい発展を遂げることとなった。

1.2 研究目的

昨今の小型人工衛星の発展に伴い、様々な種類の自己進展Boomが開発しているが、どの様なミッションで、どの様なBoomを用いる事が最適なのか。その評価基準が定まっているとは言い難い。そこで本研究は、その様な評価基準を明らかにすることを目的とする。

そこで、本研究ではまず、これまでに提案されている幾つかの自己伸展Boomの特徴を捉えたと共に、それぞれの特徴を評価項目とする事で、評価項目を網羅する。

次に、全てのBoomについて、それらの項目の評価値を求める。また、想定される幾つかのミッションについて、それらの項目の重要度を設定する。

そして、評価値と重要度から、個々のミッションに対するそれぞれのBoomの総合評価を求め、どのBoomがそのミッションに適しているのかを示す。

最後に、その評価結果が妥当であるかどうかを総合的に判断する事で、上記の評価手順が適切であるか否かを明らかにし、上記の評価基準が適切であるか否かを明確にする。ここで「総合的に判断する」部分については著者らの主観も入らざるを得ない事から、完全には客観的であると言えないが、評価値に基づく判断であるため、現状においては十分な客観性が保たれているであろうと考える。

いずれにしても、この評価手順が適切である事が明らかになれば、個々のBoomがどの様なミッションにおいて適しているかも明らかになると共に、ここのミッションの評価基準（評価項目と重要度）が明確になる。また、この手順は今後新しく開発されるであろうBoomにも適用できることから、この手順自

体が汎用的な評価基準設定法に成り得る事が示される事となる。

2. 各Boomの特徴について

以下に各Boomにおける特徴や、長さ、幅、重さなど幾つかの項目毎にまとめて記載する。ただし、参考文献によって記載がある項目や明確な記載が無い項目がある為に、幾つかの文献を基に、自身である程度の予測を立て、その数値で考察する。表においては差別化を図る為に、自身の予測値を赤字で記す。

2.1 ①Slit-Look composite Boom^[1]

宇宙空間上で伸展可能な構造は数十年にわたり用いられてきたが、高歪み複合材料の開発に伴い、近年ではその様な材料で開発されるのが主流となっている。既存のSTEM Boomと比較して、より効率的な材料で開発されたSlit-Look™ Composite Boomは構造的に且つ大きさでもとても最適なものであるといえる。

従来のBoomは伸展後に剪断力などが要因で、捻り剛性及び曲げ捻りの安定性が低下するという問題が常態化していた。その様な問題を解決する為に、Slit-Look™ Composite BoomはCTDによって開発された新しい技術である両端の継ぎ目を噛み合わせてロックする事で剛性を高める機能を有することになる。

この技術を取り入れた結果、曲げ応力を加えた際に、従来のBoomと比較して約12%耐性が増すことになった。この安定性の向上効果は、継ぎ目の数や間隔には依存せず、両端の固定条件にも依存しないことから、比較的取り入れやすい技術であると言える。以下にこのBoomの収納形状と、射出直後の状態、噛み合わせた様子の図を記す。

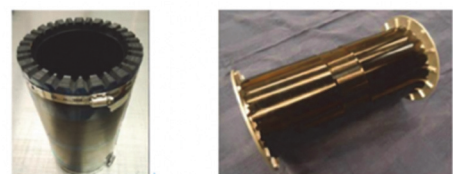


Fig.1 Slit Look Composite Boomの収納形状



Fig2 Slit Look Composite Boomの展開直後及び形状変化の推移の様子

Table 2.1 Slit-Look Composite Boomの数値

Imagination	Numerical value
Mass[g]	182
Length[m]	5.86
Unit length mass[g/m]	31.1
Width[cm]	20
Moment of inertia of area[m ⁴]	4.81×10^{-11}
Features	従来の筒状Boomよりも曲げに対する強度が高い

また,以下にSlit-Look Composite Boomをアクチュエーターで圧縮した際のスリットにおける角度と平均曲げ剛性を記す.

Table 2.2 Slit-Look Composite Boom圧縮時の曲げ剛性

Slit[°]	Average flexural rigidity : EI[N/m ²]
0	16.180
90	19.142
180	16.651
270	18.915

2.2 ②STEM Boom^{[2], [10]}

前述のSlit-Look Composite Boomが開発される前に主流とされていたBoom. 形状も前述のBoomと類似しており, 射出後に先端が丸まることで筒状に変形する. 相違点としては, 膜の両端に継ぎ目がないことであり, その為, 曲げ応力に対する耐性は比較的小さい.

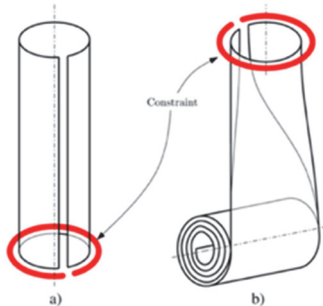


Fig.3 STEM Boomの展開後の遷移する様子及び完成形

Table 2.3 STEM Boomの数値

Imagination	Numerical value
Mass[g]	200
Length[m]	5.86
Unit length mass[g/m]	34.1
Width[mm]	20
Thickness[mm]	0.10
Moment of inertia of area[m ⁴]	1.48×10^{-11}
Features	筒状に変形する一般的なBoom. 強度は比較的低い

2.3 ③TRAC™ Boom^{[2], [5], [6]}

TRAC™ (Triangular Rollable And Collapsible) Boomは薄いシェルを開いた断面を有する形状を持つ梁に類似する構造要素のBoomである. 弾性ロールの収納と展開を繰り返す事が可能な構造である. トラス構造を持つ展開可能なBoomは他にもいくつか有るが, TRAC™ Boomは他のBoomと比較して, より低コストでコンパクトな事が特徴として挙げられる. トラス構造で有ることから, ソーラーセイルなどで用いられる.

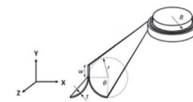


Fig. 4 TRAC™ Boomの展開形状

Table 2.4 TRAC™ Boomの数値

Imagination	TRAC™①	TRAC™②	TRAC™③
Flange radius[mm]	10.6		
Flange angle[°]	105	180	105
Combined area width [mm]	8	8	4
Thickness[mm]	0.41		
length[m]	4		
Mass[g]	592		
Unit length mass[g/m]	148		
EI _x [Nm ²]	8.15	10.78	4.26
EI _y [Nm ²]	3.32	56.07	2.40
EI _z [Nm ²]	1.3×10^{-3}	3.8×10^{-3}	4.0×10^{-3}
EI _x per unit cross section area[kN]	2109	1872	1229
EI _y per unit cross section area[kN]	859	9735	692
EI _z per unit cross section area[kN]	0.336	6.598	1.153
Features	フランジ部を有するBoom. 先端に部品を取り付けるのではなく, 膜面をとりつけるのに特化している.		

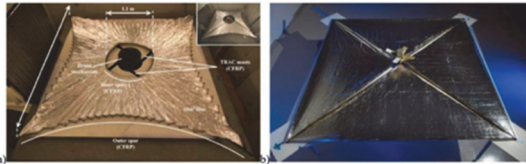


Fig. 5 NanoSaot-DV 搭載されたトラス構造のTRAC™ Boom

2.4 ④Lenticular Boom^[2]

Lenticular Boomは前述のSlit Look Composite Boomと同様に膜面形状で収納されたBoomである。相違点としては、先のBoomは展開が行われると同時に噛み合わり最終的な形状になったが、Lenticular Boomは元々、両端が接着されていることから、展開と同時に筒状の形態を持つ。

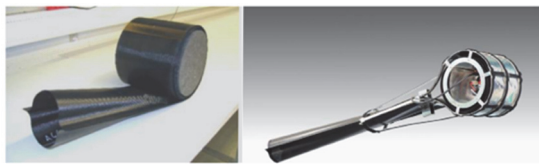


Fig.5 Lenticular Boomの形状

Table 2.5 Lenticular Boomの数値

Imagination	Numerical value
Mass[g]	250
Length[m]	5.86
Unit length mass[g/m]	42.7
Width[mm]	15
Thickness[mm]	0.2
Moment of inertia of area[mm ⁴]	-
Features	予め筒の形状になっている。その為収納には従来のBoomよりもスペースを要する。

2.5 ⑤Blossoming of Deployable Coiled Boom^{[3], [9]}

コイル状で展開可能なBlossoming of Deployable Coiled Boomは巻尺のような形状をしている。単一の正方形の箱に収納されており、展開時は4方向からBoomを射出する。展開前の収納段階では一枚の膜であるが、こちらのBoomも展開後に大きく曲がることで、筒状の形状に変化する。

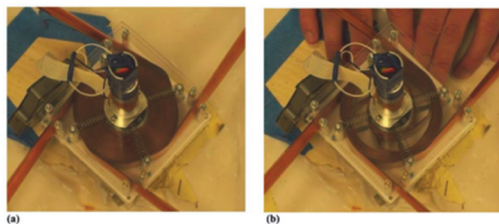


Fig.6 Blossoming of Deployable Coiled Boomの様子

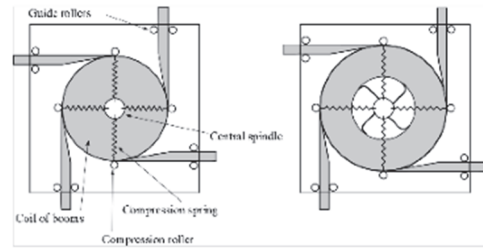


Fig.7 Blossoming of Deployable Coiled Boomの4射出口の様子

Table 2.6 Blossoming of Deployableの数値

Imagination	Numerical value
Mass[g]	150
Length[m]	3.6
Unit length mass	41.7
Width[mm]	25.4
Thickness[mm]	0.1
Moment of inertia of area[mm ⁴]	-
Features	四方からBoomを射出する事が可能

2.6 ⑥SIMPLE Boom^{[4], [8]}

CubeSatを用いたミッションにおいて用いられるようになった背景を持つSIMPLE Boom。自己完結型の線形メーター展開可能Boomであり、展開可能なアーキテクチャに加えて、複合テープスプリングを組み込んだ形状である。複合材料の特性上、テープスプリングを非常にシンプルな方法で巻き取り・射出する事が可能である。



Fig.8 SIMPLE Boomの形状

Table 2.9 SIMPLE Boomの数値

Imagination	Numerical value
Mass[g]	148.0
Length[m]	1
Unit length mass[g/m]	148
Width[mm]	10
Moment of inertia of area[mm ⁴]	-
Features	伸展・収納、両工程を簡潔に行う事が可能

2.7 ⑦STACER Boom^{[7], [11]}

QuakeSat Cubesatで用いられるSTACERブーム。特徴として伸縮性に優れ、全体を通じて高い剛性をもつ事が挙げられる。ただ、質量は他のブームと比較して大きく、包装率も低い。(頑張

ったとしても10%が限界) アクティブな展開制御が可能なモーターを搭載する事が前提条件となる。

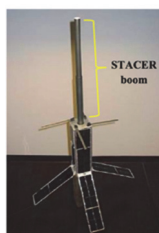


Fig.9 STACER Boomの形状

Table 2.1 STACER Boomの数値

Imagination	Numerical value
Mass[g]	500
Length[m]	2.5
Unit length mass[g/m]	200
Width[mm]	30
Moment of inertia of area[mm ⁴]	-
Features	巻き取られた状態ではなく、予め棒状で収納されたBoom. 包装されている割合が低い。

3. Boom毎の特徴を踏まえた上で比較

ここまで様々なBoomに関する特徴や数値について記載してきた。それを踏まえて、各Boomの算出した固有数値から、それぞれの項目毎に比較する。その上で優れた数値を明確にする為に、評価を「○」「△」「×」で出す。尚スペースの関係上、Boomの正式名称を記入できるスペースが無いことから、Boomに通し番号を振るものとする。第2章において、中題目を記載したが、その横に書かれている番号が対応する番号である。

	1	2	3	4	5	6	7
Unit length mass[g/m]	○	○	×	△	△	×	-
Width[mm]	△	△	-	○	△	○	-
Moment of inertia of area[mm ⁴]	△	△	-	-	-	-	-

4. まとめ

様々なBoomについて評価項目毎に比較した。その結果、Boomは収納形状が梁状のものよりも膜面とされている ex) Slit-Look Composite Boom 方が単位長さ辺りの質量が小さいことが分かった。また、曲げ応力の耐性については、自己伸展して形状変化するものよりも、収納状態の段階から、形状を保たれているもの ex) Lenticular Boomの方が強いと言える。

総じて、優れているBoomの評価基準は、比較的軽量の膜形状かつ、筒状状態で合致点が噛み合わせ形状を持つ高強度の

ものであると言える。

謝辞

本研究を行うにおいて、アドバイスをしてくださった諸先輩方、参考文献を作成した諸研究者に深く感謝致します。

参考文献

- [1] Alexi S : Experimental and Analytical Characterization of a Slit-Look™ Composite Boom, AIAA SciTech Forum, 2017
- [2] Thomas W etc : TRAC™ Boom Structural Mechanics AIAA SciTech Forum, 2017
- [3] Adam Hoskin : Blossoming of Coiled Deployable Booms AIAA SciTech Forum, 2015
- [4] JoAnna Fulton : Flight Qualification Testing of a Meter-class CubuSat Deployable Boom, AIAA SciTech Forum, 2015
- [5] Christophe Leclerc : Ultra-Thin Composite Deployable Booms, Proceedings of the IASS Annual Symposium, 2017 “Interfaces: architecture.engineering.science” 25 - 28th September, 2017, Hamburg, Germany Annette Bögle, Manfred Grohmann (eds.)
- [6] Christophe Leclerc : Characterization of Ultra-Thin Composite Triangular Rollable and Collapsible Booms, AIAA SciTech Forum, 2017
- [7] Pau Mallol Parera : Deployment Simulations of a Composite Boom for Small Satellites, Technical Reports from Royal Institute of Technology, May 2013.
- [8] Pau Mallol : Experiments and Simulations of the Deployment of a Bistable Composite Boom, Royal Institute of Technology, 2017
- [9] A Stabile, S Laurenzi : Coiling dynamic analysis of thin-walled composite deployable boom, Department of Astronautic, Electrical and Energy Engineering Sapienza University of Rome, Italy, 29 May 2014
- [10] S. Seriani, P. Gakkina : A Storable Extendible Tubular Extendible Member (STEM) parallel robot : Modelization and evaluation, University of Trieste Dept. of Engineering and Architecture, Valerio, 10 November 2014,
- [11] David Sundkvist : Cubesat Radio Interferometry Experiment CURIE, sundkvist@sst.berkeley.edu, 2018-05-02