

STEM型閉断面マストの構造特性に関する研究

Study on structural characteristics of the STEM type mast with closed cross-section

指導教授 宮崎康行

M7002 荒木友太

1. 序論

近年、宇宙構造物の大型化に伴い、軽量・高収納で打ち上げ後に軌道上で展開する、インフレータブル構造に注目が集まっており、大型通信アンテナ、発電システム、宇宙建材など、様々な用途に利用することを旨とし、世界中で様々な研究が進められている^[1]。



Fig. 1 インフレータブル構造物の例^{[2][3]}
(左: アンテナ, 右: 月面タワー)

しかし、インフレータブル構造の技術はいまだに、実用化には至っていない。

日本においても、インフレータブル構造に関する様々な研究が行われており、その一つにインフレータブル方式によるSTEM型伸展マストがある。このマストは、複合材の三軸織によって製作したSTEMビームの内側にインフレータブルチューブを取り付け、チューブの伸展とともにSTEMビームが追従して伸展し、伸展後はSTEMビームが棒材として剛性を得るものである。このSTEM型マストは、軽量・高剛性・真直性を兼ね備えており、宇宙構造物として使用されることが期待されている。また、観測ロケットによる、このSTEM型マストを利用した伸展アンテナの実験もおこなわれている^{[4][5]}。

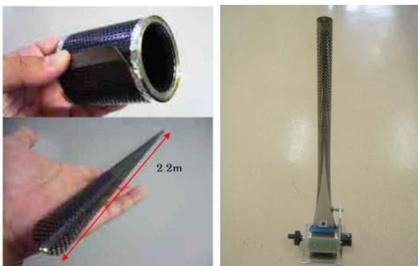


Fig. 2 STEM型マスト
(左: 3軸織STEMビーム, 右: 伸展マスト)

しかし、この方式のSTEM型マストは1枚のSTEMビームが伸展することで棒材に変形するため(Fig. 2左図)、構造的に閉断面となるために剛性が低く、宇宙構造物の主構造部材として使用するまでには至っていない。

そこで、このSTEM型マストを構造部材として実用化するための1つの方法として、マルチSTEM型マストにより閉断面化を行い、剛性の向上を図ることが検討されている(Fig. 3)。

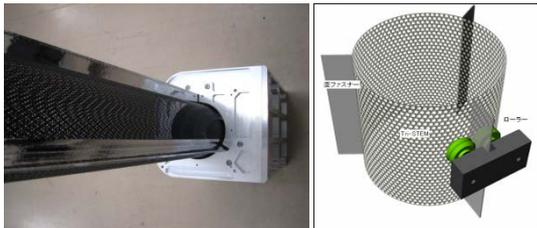


Fig. 3 STEM型閉断面マスト

詳細については、第3節で述べるが、Fig. 3のSTEM型閉断面マストは、国際宇宙ステーション日本実験棟船外プラットフォーム上

での暴露実験に提案されている、宇宙インフレータブル構造の宇宙実証「SIMPLE」(Space Inflatable Membrane structure Pioneering Long-term Experiments)の搭載装置の1つであるインフレータブル伸展マスト(Inflatable Extension Mast, 略称: IEM)である。

「SIMPLE」の目的は、①宇宙インフレータブル構造の基本技術実証、②宇宙インフレータブル構造のアプリケーションの提示およびその技術実証、③宇宙インフレータブル構造システムの運用のためのノウハウの蓄積、であり、今後の宇宙開発に必要な基礎技術として宇宙インフレータブル構造が有用な技術であることを示し、この分野の技術発展に寄与することである。「SIMPLE」は、長期間に亘って軌道上のデータを観察・計測を行い、そのデータを基に解析を行う。IEMに関してはマストの振動数を計測し、そのデータから構造特性の解析を行う。そのため、振動数から、閉断面マストの構造特性を検証するための解析モデルが必要となっている^[6]。

さらに、この閉断面マストは、Fig. 1右図の月面タワーなど宇宙で構造部材として利用することが検討されており、設計の際に使用する構造解析モデルが必要である。「SIMPLE」により軌道上でのデータの取得が行え、モデルの軌道検証は可能となる。残すところは、軌道検証されたモデルと整合性がある構造解析モデルの構築のみとなっている。

したがって、「SIMPLE」による軌道実証、および、その後の閉断面マストの実用化に向けて、まずは構造解析モデルを早急に構築する必要がある。

2. 本研究の目的

以上の背景から、本研究の目的を、「SIMPLE」に搭載されるインフレータブル伸展マストであるSTEM型閉断面マストの構造特性を把握することとし、具体的には、以下の2つの課題を実施する。

- (1) 複数の解析モデルで解析を行い、モデルの簡易化を行うことができるかを検証する。
- (2) 実験結果と数値計算結果との比較を行い、解析モデルの評価を行う。

3. 解析モデルの製作

STEM型閉断面マストの構造について示す。このマストは、3本からなる3軸織りシステムを、面ファスナーを利用してお互いを拘束することで、1本のマストとなる。Fig. 4は、1本の3軸織システムの写真であり、システムの縁には面ファスナーが接着されている。Fig. 5の上段左図は、本体にSTEMが3本搭載された様子で、上段右図は、面ファスナー同士が係合する前の図である。Fig. 5下段の図は面ファスナー同士を係合させた後の図である。最終的にFig. 6のようにSTEM型閉断面マストが完成する。

また、面ファスナー同士の係合は、Fig. 3右図の緑色の一對のローラー部の間を面ファスナーが通過することで、面ファスナーの表裏2方向から軽く圧力を加えることで係合が行われる。

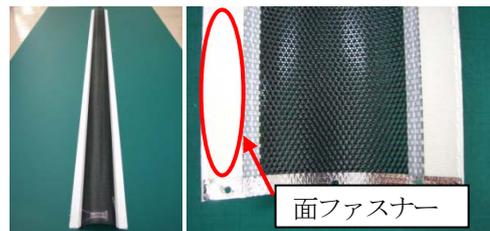


Fig. 4 STEM

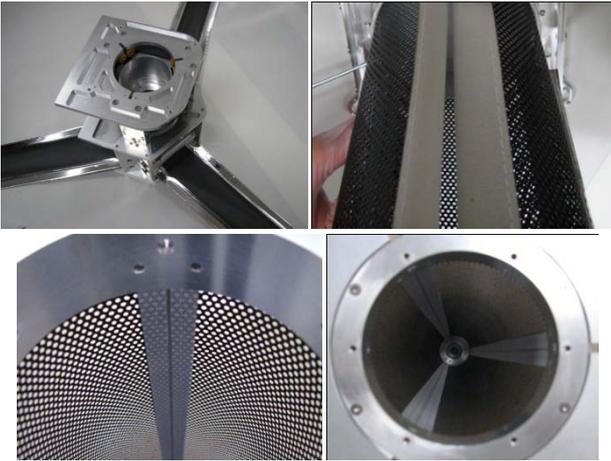


Fig. 5 マストのアセンブリ行程

(上段左：3本のステム、上段右：面ファスナー部拡大図、
下段左：面ファスナー係合後、下段右：マスト内部)



Fig. 6 ステム型閉断面マスト

伸展完了後は、本体とマスト部の固定が行われ、拘束される。拘束方法は、マスト部と本体の拘束機構部を接触させ、摩擦力で拘束されており、6点で拘束される。また、拘束機構は同様な機構が2個搭載されており、計12点で拘束されている。Fig. 7に拘束機構とマストの接触箇所を示す。

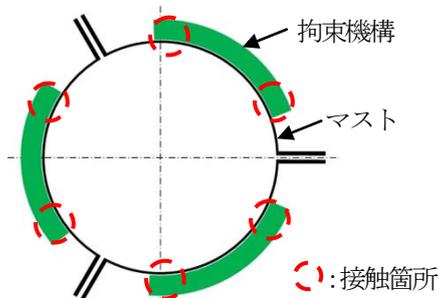


Fig. 7 拘束機構とマストの接触箇所

ステム型閉断面マストの構成図を Fig. 8 に示す。

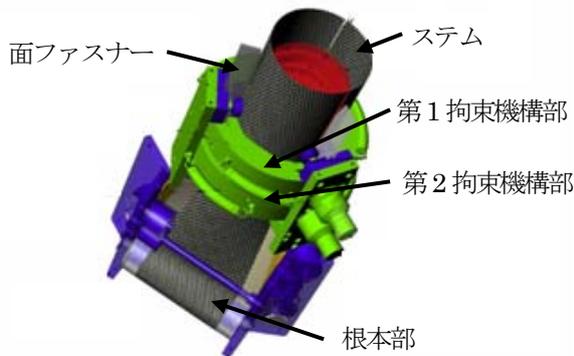


Fig. 8 ステム型閉断面マスト構成図

ステム同士を結合させている面ファスナーは120[deg.]間隔で設けられている(Fig. 9)。

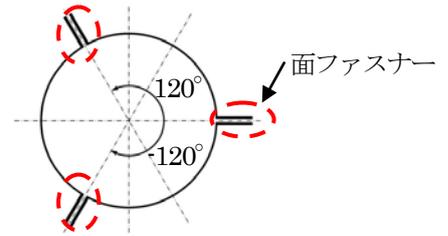


Fig. 9 面ファスナー配置図

3.1. 解析モデル

Fig. 3から Fig. 6に示した、ステム型閉断面マストを基に、単純円筒型、面ファスナー部一体型、面ファスナー部分割型の3種類の解析モデルを製作した。3種類のモデル製作した理由として、面ファスナー部が特性にどのような影響を及ぼすかを調べるためである。また、モデル化および解析には汎用 FEM ソフトの ANSYS を用いて行った。

以下より、それぞれの解析モデルについて示す。

3.1.1. 単純円筒形モデル

面ファスナー部を除いた、円筒のみで構成された最も単純なモデルである。

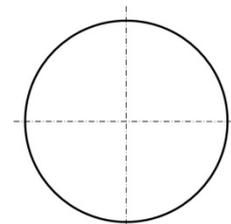


Fig. 10 単純円筒形モデル断面形状

3.1.2. 面ファスナー部一体型モデル

単純円筒モデルに、面ファスナー部を直方体としてモデル化し、円筒部に足し合わせたモデルである。

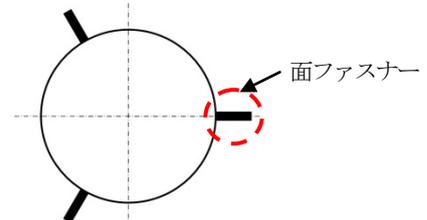


Fig. 11 面ファスナー部一体型モデル断面形状

3.1.3. 面ファスナー部分割型モデル

マストを面ファスナー部で分割し、マスト全体を3分割したモデルである。Fig. 13には面ファスナー部の拡大図を示す。実際のマストの構成に最も近いモデルである。

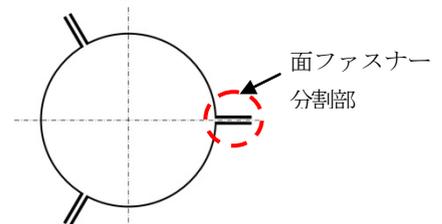


Fig. 12 面ファスナー部分割モデル断面形状

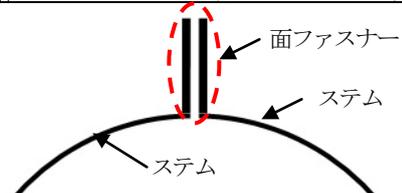


Fig. 13 面ファスナー部拡大図

3.2. 拘束条件

マストの拘束は、Fig. 8にあるように、第1拘束部、第2拘束部で各6点の計12点の拘束を行い固定される。解析モデルでは、拘束機構部の12点の拘束を組み込んでいる。また、ステムの根本は、完全には固定されていない。そこで、根本の拘束は、完全拘束と拘束自由の中間に考え、拘束条件をTable 1に示すように4種類について行った。

Table 1 拘束条件

拘束条件	拘束箇所		
	第1拘束部	第2拘束部	ドラム部
Type 1	拘束	なし	なし
Type 2	なし	なし	拘束
Type 3	拘束	拘束	なし
Type 4	拘束	拘束	拘束

拘束部の位置を Fig. 14 に示す。

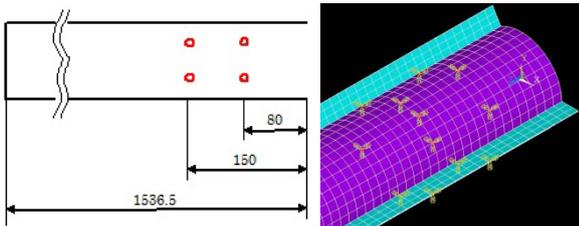


Fig. 14 拘束部

3.3. 解析パラメータ

ステム型開断面マストの形状データをTable 2に、材料定数およびFEM解析時の要素をTable 3に示す。

Table 2 マスト形状データ

		値	単位
ステム	全長	1536.5	mm
	直径	100	mm
	厚さ	0.302	mm
面ファスナー	全長	1536.5	mm
	幅	20	mm
	厚さ	0.310	mm

Table 3 材料定数およびFEM解析時要素

部材	要素	ヤング率E MPa	ポアソン比ν	密度ρ kg/m ³
ステム	シェル要素	11700	0.622	681
面ファスナー	ソリッド要素	390	0.35	346

ただし、解析時ステム部のポアソン比は0.4999を使用。

各モデルとも、2[kg]の先端マスを加えている。また、要素分割形状は各モデル共通で10×10[mm]である。

4. 実験結果

伸展後のマストの固有振動数、および静的荷重を加えたときの剛性値の測定を以下の手順で行っている。

- マストの先端をエアータブルの上に置かれたジグに載せ、自重と摩擦力の影響を減らし、片持ち梁の状態にする。
- マスト先端に引張、圧縮、曲げ荷重を加え、それぞれの荷重について先端の変位をレーザーセンサを用いて計測し、PCに計測データが保存される。



Fig. 15 剛性試験

以下に、実験結果を示す。

Table 4 実験結果

試験名	荷重	結果
振動試験	-	3.66Hz
引張試験	5.3N	945.6N/mm
圧縮試験	5.3N	736.0N/mm
曲げ試験	5.3N	0.835N/mm

5. 解析結果

静荷重 5.3[N]をマスト軸方向に引張・圧縮荷重、垂直方向に曲げ荷重として加えたときの静解析の結果と、動解析の結果を以下に示す。また、固有振動数について実験結果と解析結果の比較をTable 5に示す。

Table 5 固有振動数の比較

拘束条件	単純円筒 [Hz]	面ファスナー部 一体型[Hz]	面ファスナー部 分割型[Hz]	実験結果 [Hz]
Type1	4.108	4.194	3.249	3.66
Type2	3.773	3.791	3.044	
Type3	4.223	4.252	3.367	
Type4	4.234	4.257	3.382	

● 単純円筒形モデル

単純円筒形モデルの各拘束条件時の結果、およびType4の場合の固有振動モード図、拘束条件応力分布図を以下に示す。

Table 6 単純円筒形モデル

拘束条件	固有振動数 [Hz]	引張応力 [MPa]	圧縮応力 [MPa]	曲げ応力 [MPa]
Type1	4.108	0.206	0.206	7.14
Type2	3.773	0.079	0.079	4.88
Type3	4.223	0.152	0.152	7.14
Type4	4.234	0.147	0.147	6.92

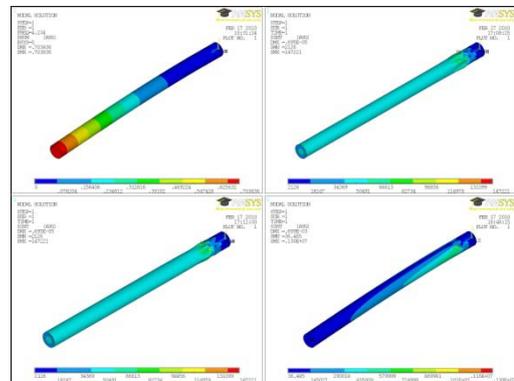


Fig. 16 単純円筒形モデル解析結果(Type4)
(上段左:固有振動モード, 上段右:引張応力分布,
下段左:圧縮応力分布, 下段右:曲げ応力分布)

● 面ファスナー部一体型モデル

面ファスナー部一体型モデルの各拘束条件時の結果、およびType4の場合の固有振動モード図、拘束条件応力分布図を以下に示す。

Table 7 面ファスナー部一体型モデル

拘束条件	固有振動数 [Hz]	引張応力 [MPa]	圧縮応力 [MPa]	曲げ応力 [MPa]
Type1	4.194	0.204	0.204	9.01
Type2	3.791	0.205	0.205	4.91
Type3	4.252	0.204	0.204	7.44
Type4	4.257	0.204	0.204	7.32

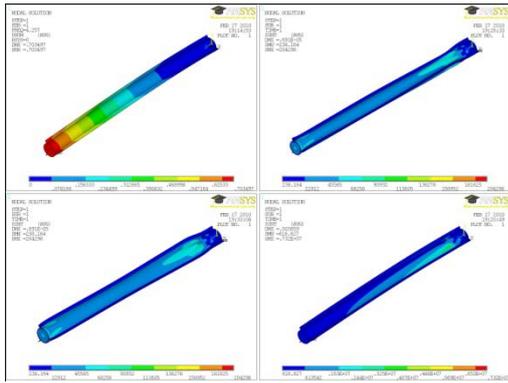


Fig. 17 面ファスナー部一体型モデル解析結果(Type4)
(上段左:固有振動モード, 上段右:引張応力分布,
下段左:圧縮応力分布, 下段右:曲げ応力分布)

● 面ファスナー部分割型モデル

面ファスナー部分割モデルの各拘束条件時の結果, および Type4 の場合の固有振動モード図, 拘束条件応力分布図を以下に示す.

Table 8 面ファスナー部分割モデル

拘束条件	固有振動数 [Hz]	引張応力 [MPa]	圧縮応力 [MPa]	曲げ応力 [MPa]
Type1	3.249	0.203	0.203	21.3
Type2	3.044	0.189	0.189	12.2
Type3	3.367	0.196	0.196	11.1
Type4	3.382	0.195	0.195	11.1

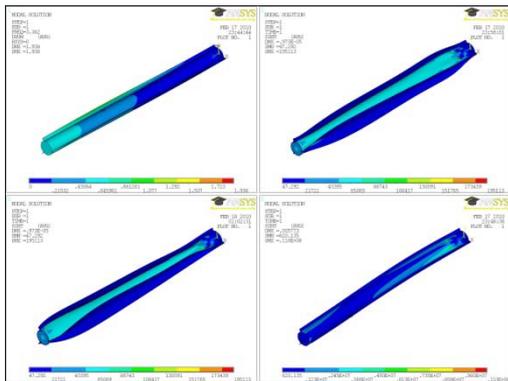


Fig. 18 面ファスナー部分割モデル解析結果(Type4)
(上段左:固有振動モード, 上段右:引張応力分布,
下段左:圧縮応力分布, 下段右:曲げ応力分布)

5.1. 拘束条件による影響

単純円筒形モデルの解析結果(Table 6)を例に拘束条件の影響を考える.

Type3, Type 4 が実際の拘束に近い条件であり, 違いは根本部の拘束の有無だけである. Type3 は両端が自由端であり, Type4 は一方のみが自由端となっている. ここで, 片持ち梁の 1 次の固有振動数は,

$$\Omega = \left(\frac{1.875}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

で表すことができ, 固有振動数は梁の長さ l^2 の影響を受ける.

今回の場合, 第 2 拘束部と根本部の間隔が狭いため固有振動数にあまり差が生じなかったものと考えられる.

5.2. 実験データとの比較

実験で得られた固有振動数は Table 4 より 3.66[Hz]である. しかし, 3 種類の解析モデルでの固有振動数の解析結果と比較すると (Table 5), 単純円筒型, 面ファスナー部一体型では, 0.6[Hz]程度高く, 面ファスナー部分割型では, 0.3[Hz]程度低い結果となっている.

実験結果と解析結果が僅かながらずれた原因として, 面ファスナー部の剛性による影響が考えられる.

単純円筒型モデルは, 面ファスナー部をモデルに組み込んでいないため, 面ファスナーが構造特性に影響を及ぼさず, ステム材の特性のみが解析結果として出ていると考えられる.

面ファスナー部一体型モデルは, 単純円筒型モデルよりも固有振動数が高い, 原因としては, 面ファスナー部を単純に円筒部に足し合わせただけであるため, 面ファスナー部の剛性が円筒部の剛性に加わり, マスト自体の剛性が増したために固有振動数が高くなったと考えられる.

最後に, 面ファスナー部分割型モデルについて考えてみる. このモデルだけが唯一実験値より固有振動数が低くなっている. 面ファスナー部を分割し, ファスナー間はファスナー係合力で接触するようにモデル化しているため, 上記 2 つのモデルより剛性が低いものと考えられる. しかし, 実験値より低くなってしまった原因としては, 面ファスナーとステムを結合する際に使用するテープ等をモデル化していないためだと考えられる.

以上のことから, 面ファスナー部が構造の剛性に影響を及ぼすことが確認できた.

また, 当初は簡略化したモデルで予測できると考えていたが, 面ファスナーの接着部の剛性が固有振動数等, 動特性に無視できない影響を与えることがわかった. 今後は, 面ファスナー部のモデル化をより詳細にすることで, 実機の軌道上挙動予測精度をさらに向上できると考えられる.

6. 結論

本研究のまとめは以下の通りである.

- ステム型閉断面マストの 3 種類の解析モデルの解析結果を示し, 面ファスナー部の接着剛性が構造全体の剛性に最も影響を与えることを示した.
- 実験値と解析値の比較を行い, 解析モデルの有用性が確認できた.

今後の課題としては,

- 実験結果と解析モデル間の精度向上のため, 面ファスナー部のモデル化をより詳細に行うことで, 精度の向上を図り, 将来の実用化に向けた構造解析モデルの構築を行う。
- が上げられる.

参考文献

- [1] H.M.Jenkins(ed.), "Gossamer Spacecraft: Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Application," Progress in Astronautics and Aeronautics Vol.191, 2000.
- [2] <http://images.jsc.nasa.gov/luceneweb/fullimage.jsp?searchpage=true&keywords=spartan207&textsearch=Go&hitsperpage=5&pageno=1&photoId=s77e5022>
- [3] <http://www.isas.ac.jp/j/forefront/2006/higuchi/03.shtml>
- [4] K.Higuchi, K.Watanabe, A.Watanabe, H.Tsunoda, and H.Yamakawa, "Design and Evaluation of an Ultra-light Extendible Mast as an Inflatable Structure", AIAA2006-1809, 47th AIAA/ASME/ ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Newport, Rhode Island, 2006.
- [5] K.Higuchi, Y.Ogi, K.Watanabe, and A.Watanabe, "Verification of Practical Use of an Inflatable Structure in Space", 26th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2008-c-08, June 2008, Hamamatsu.
- [6] 青木 隆平, 石村 康生, 泉田 啓, 角田 博明, 古谷 寛, 宮崎 康行, 石澤淳一郎, 岸本 直子, 樋口 健, 酒井 良次, 渡邊 秋人, 渡辺 和樹 「宇宙インフレーター構造の宇宙実証」第 24 回宇宙利用シンポジウム, 2008