室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

展開宇宙構造物に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2015-03-25 キーワード (Ja): キーワード (En): Deployable boom, Bi-STEM boom, SMA-BCON boom, Structural Analysis, Deployment experiments 作成者: 勝又, 暢久, 樋口, 健, 大加瀬, 容平, 貝森, 政明 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3781

室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

展開宇宙構造物に関する研究

その他（別言語等）のタイトル	Development on Deployable Space Structures
著者	勝又　暢久，樋口　健，大加瀬　容平，貝森　政明
雑誌名	室蘭工業大学紀要
巻	64
ページ	69-76
発行年	2015-03-13
URL	http://hdl.handle.net/10258/3781

室工大紀要第 64 号（2014）69~76

特　　集

展開宇宙構造物に関する研究

勝又 暢久[*1*2]，樋口 健[*1*2]，大加瀬 容平[*3]，貝森 政明[*4]

Development on Deployable Space Structures

Nobuhisa KATSUMATA[*1*2], Ken HIGUCHI[*1*2], Yohei OOKASE[*3], Masaaki KAIMORI[*4]

(原稿受付日　平成 26 年 11 月 28 日　論文受理日　平成 27 年 1 月 22 日）

Abstract

The purpose of this paper is to introduce two deployable booms for corresponding to the recent request of high accuracy and/or large space structure, which are Storable Tubular Extendible Member (STEM) boom and Braid Coated Bi-Convex Tape boom applying Shape Memory alloys (SMA-BCON). As for STEM boom study, the static shape of Bi-STEM is firstly obtained by contact analysis between inner and outer shells. Then, the dynamic behavior of the Bi-STEM is examined by transient analysis. As for SMA-BCON boom study, the deployment behavior is evaluated using handmaid conceptual model. The stepwise deployment behavior is achieved and the importance of synchronous deployments of each boom for the stable center body behavior is pointed out through deployment experiments.

Keywords: Deployable boom, Bi-STEM boom, SMA-BCON boom, Structural Analysis, Deployment experiments

1　はじめに

宇宙ミッションの高度化に伴い，近年では宇宙構造物のさらなる大型化または高精度化が求められている．高精度化の要求に対しては，宇宙空間における厳しい熱環境変化による変形やヒンジ・ラッチ部のミスアライメントなどにより生じる精度劣化が問題となる．この問題への対応策として，宇宙空間へ打ち上げ後にアンテナやリフレクターの形状を計測し，その計測結果を用いて精度が向上するように形状を変化・適応させるスマート構造 (Smart Structure) や適応構造 (Adaptive Structure) が考えられ，現在さまざまな研究が行われている．また大型化の要求に対応するためには，輸送時の質量・体積の制約から，打ち上げ時には収納し，宇宙空間で展開して大型化できる展開構造が必須となる. 近年ではゴサマー構造 (Gossamer Structure) に代表される膜面やケーブルを用いた超軽量構造や，気体などで膨らませて展開させるインフレータブル構造などの超軽量構造物の研究が盛んに行われている．またこれらの超軽量構造を展開させ，さらに展開後に形状を維持できるだけの剛性を維持できる伸展ブームは，展開構造において重要な構造要素の一つである．構造全体の高精度化，大型化に対応するためにも，伸展ブームのさらなる軽量化と高剛性化，また高収納性と確実な展開のための機構の簡略化が，伸展ブームの設計において重要となる．

これらの背景を踏まえ，2 種類の伸展・展開ブームについての研究成果を紹介する．

1 つ目は, 伸展ブームとして宇宙での利用実績も有する薄肉開断面梁 STEM (Storable Tubular Extendible Member) ブームの研究成果について示す．比剛性と真直性を高めるために二重にし，そ

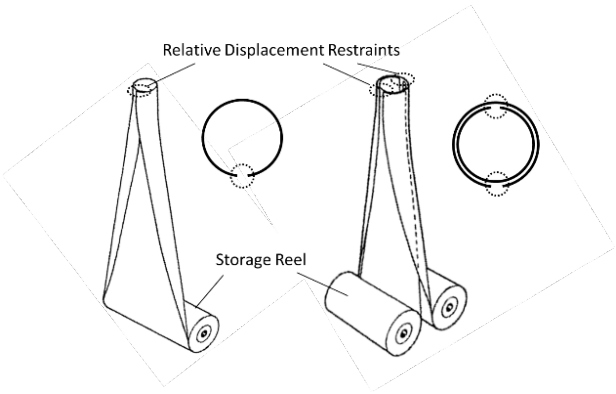
*1 室蘭工業大学　もの創造系領域
*2 室蘭工業大学　航空宇宙機システム研究センター
*3 室蘭工業大学　航空宇宙システム工学専攻
*4 室蘭工業大学　機械航空創造系学科卒業

れぞれの STEM が分離しないように先端開口部を結合した Bi-STEM 構造（図 1）を研究対象とした．二重にすることで生じる内外シェル間接触や断面形状の変化が力学特性に及ぼす影響について，接触を考慮した有限要素解析により解析的に形状を求め，時刻歴応答解析によって摩擦の影響を検討した結果を示す．

2 つ目は，STEM ブーム同様に軽量かつ高剛性伸展ブームとして近年開発された組紐被覆コンベックステープブーム[(5), (6)]（Braid Coated Bi-Convex tape Boom，以降 BCON ブームとする）に関する研究を示す．BCON ブームの利点を活かしつつ，小型化と展開力の制御性を考慮してコンベックステープ（巻尺）部分に SMA（Shape Memory Alloys）を適用した新たな伸展ブーム「SMA-BCON ブーム」について，構造概念の実証を目的としたモックアップレベルの展開実験結果を示す．

2　Bi-STEM ブームの概要と研究目的

観測衛星のスピン面内とスピン軸方向の 3 軸にアンテナを配置することで計測精度を高める観測ミッションが提案されている．スピン軸方向への伸展においては，高い比剛性と真直性がスピン衛星の姿勢安定性のためにきわめて重要である．それらの要求を満たす一次元伸展構造物として，薄肉円形開断面梁を収納リールから送り出して伸展する STEM ブームの適用が検討されている（図 1）．



(a) Uni-STEM　　(b) Bi-STEM

図 1　Uni-STEM と Bi-STEM の概念図[4]

STEM は，あらかじめ所望の形状（ex. 円筒状）に成形した材料を再度裾開きして巻き取って収納し，宇宙空間で拘束を解放して形状を復元する手法（構造硬化模擬）を用いることで，伸展後の形状精度を得ている．そのため，伸展機構の単純化，軽量化や打上げ時の小型化，および宇宙空間における確実な伸展が期待できる．特に，図 1 (b) のように薄肉円形開断面梁を二重にし，先端開口部を結合した Bi-STEM は，曲げとねじりの連成が抑制されるため，高い比剛性と真直性を示す．

STEM に関する過去の研究では，真空槽内や微小重力下における実験，あるいはパラメータ調整を行った近似モデルによる数値解析等が行われている[(1)~(3)]．しかし，Bi-STEM の力学特性あるいは内外シェル間接触や断面形状の変化がそれらに及ぼす影響は明らかにされていない．物理現象を正確にとらえて解析の信頼性および精度を向上させるためには，Bi-STEM にしたことで生じる特性変化を明らかにすることが重要となる．

そこで本章から第 5 章までにおいて，内外シェル間接触および断面形状の変化を考慮した Bi-STEM の静的形状を，汎用解析ソフトウェア ANSYS を用いた非線形静解析によって取得する．次に，得られた有限要素モデルに対する時刻歴応答解析を行い，Bi-STEM の動的特性を検討する．

3　非線形静解析による Bi-STEM の形状取得

3.1　Uni-STEM 解析モデルの作成

Bi-STEM の構成要素は，薄肉開断面伸展梁 Uni-STEM である．図 1 (a) に示すように，Uni-STEM は収納リールで巻き取るために固定端が直線状に開いた形状（以降，裾開き形状）となっている．また自由端には図 2 のような先端ビスを付けて，相対変位を拘束している．STEM の材料は，高比剛性かつ適度な柔軟性を有するサカセ・アドテック製の三軸織 CFRP (TWF-CFRP) として解析モデルに反映した(表 1).

Uni-STEM の自然な静的裾開き形状を得るために，図 3 に示す一様断面の薄肉円形開断面梁を作成する．自由端の開口部には先端ビスを模擬する硬いばね要素（$k = 1.0 \times 10^4$[N/m]）を用いて開口部 2 節点を結合している．次に，固定端節点を図 4 に示すサイクロイド経路に沿って強制変位させて展開する．この過程は大変形問題であるので，Newton-Raphson 法を用いた繰り返し計算によって解を求める．その結果得られた静的形状を図 5 に示す．

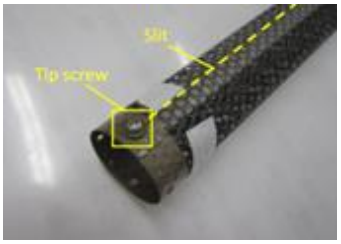


図 2　Uni-STEM 先端ビス

表 1　解析に用いた三軸織 CFRP の材料物性値

Young's modulus E [GPa]	Poisson's ratio ν	Density ρ [kg/m^3]
15.035	0.499	999

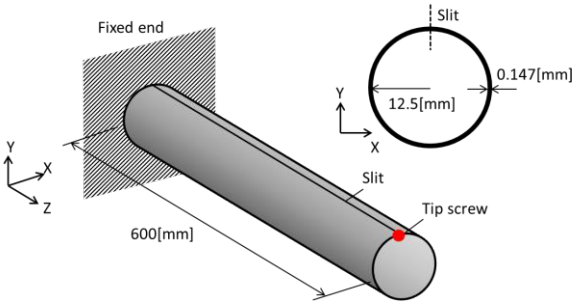


図 3　薄肉円形開断面梁の形状寸法

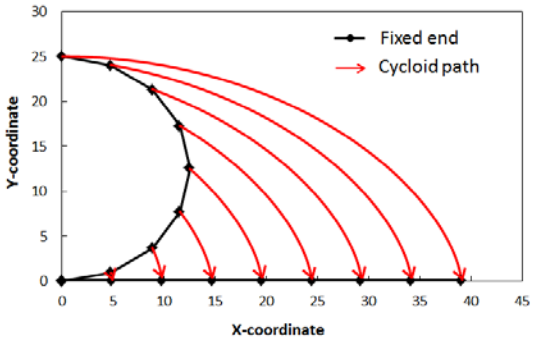


図 4　各節点のサイクロイド経路（X>0 の部分のみ）

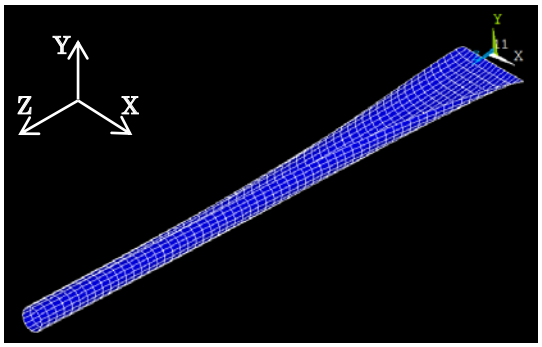


図 5　Uni-STEM の静的形状

3.2　Bi-STEM 解析モデルの作成

前項では，薄肉円形開断面梁の固定端をサイクロイド経路に沿って強制変位させることにより Uni-STEM の静的形状を得た．本項では，前項と同じ寸法の薄肉円形開断面梁を二つ用い，接触解析によって Bi-STEM の静的形状を求める(図 6). なお，Bi-STEM の先端ビスを模擬するために, 図 7 (b) のように 6 つの硬いばね要素（$k = 1.0 \times 10^4$[N/m]）を用いて開口部付近の節点を結合する．Bi-STEM 解析モデルの作成手順を以下に示すとともに，得られた静的形状を図 8 に示す．

—作成手順—

(1) XYZ 空間に内側シェル，外側シェル，剛体平板を作成する．また，あらかじめ図 7 (b) のように6つのばね要素を作成しておき, 図 7 (a) のように一部のばね要素を無効化（剛性を微小化）する．

(2) 内外シェルの固定端を前項のサイクロイド経路に沿って展開する．

(3) 外側シェルの自由端開口部2節点にX方向荷重 $Fx = \pm 4$[N] を与えて展開する．このとき，外側シェルを剛体平板に押し付けながら展開することにより，外側シェルの長手方向中央付近が自然に展開される．

(4) 内側シェルを-Y 方向に移動させ，先端を外側シェルの内面に接触させる．

(5) X 方向荷重$Fx = \pm 4$[N] を徐々に小さくし，外側シェルの自由端を閉じる．

(6) 剛体平板を-Y 方向に遠ざけることにより，外側シェルの長手方向中央付近が自然に閉じられる．

(7) 円筒中心を内外シェル固定端の中央に変位させ，図 7 (b) のようにすべてのばね要素を有効化したのち，先端の変位拘束を削除する．

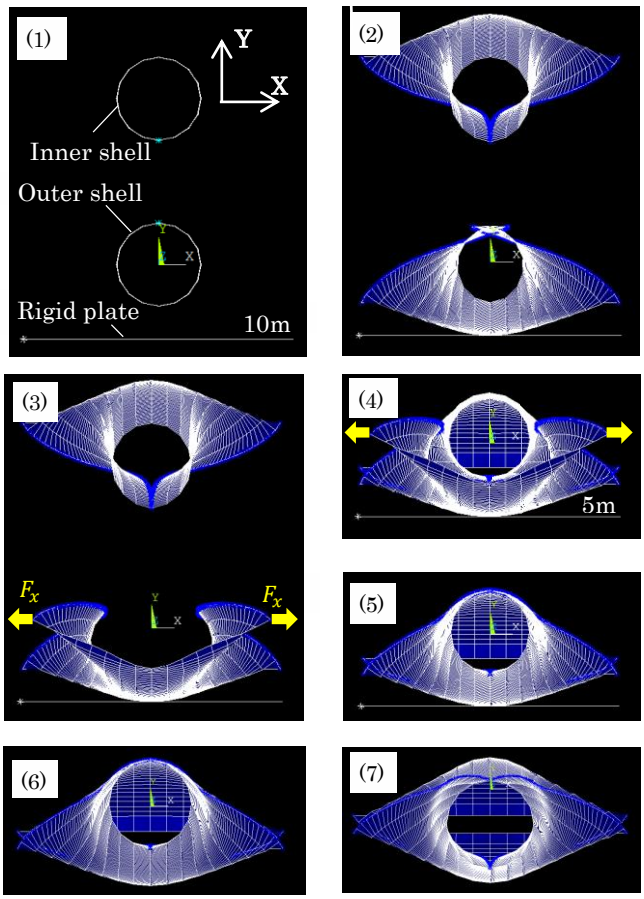
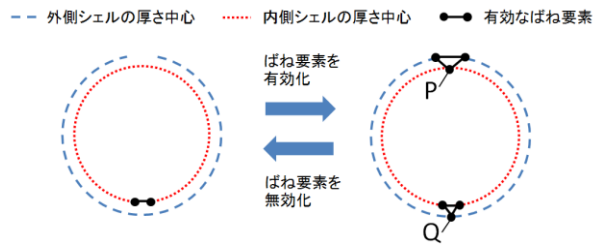


図 6　Bi-STEM 静的形状の作成手順



(a) 静的形状完成前　　(b) 静的形状完成後

図 7　ばね要素による先端ビスの模擬

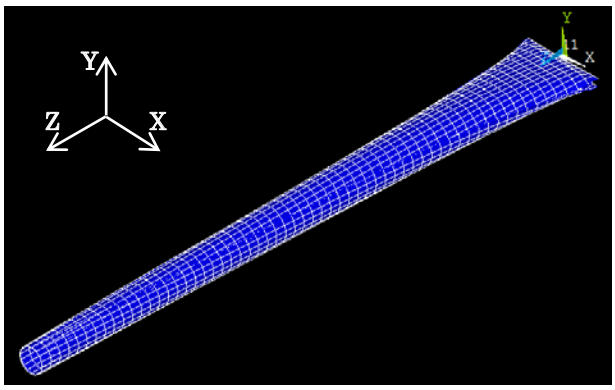


図 8　Bi-STEM の静的形状

4　時刻歴応答解析による Bi-STEM の動的特性

Bi-STEM は，内外シェル間の接触問題を含むため，接触面を線形ばねで結合する通常のモーダル解析では正確な固有振動数を算出することができない．そのため時刻歴応答解析を実施して，接触状態の時間変化を考慮した自由減衰振動の変位履歴を求める．この変位履歴をさまざまな内外シェル間摩擦係数について求め，摩擦係数の大きさが振動周期や減衰率に与える影響を調べた．解析には，前節で作成した Bi-STEM 解析モデルを用いた．また表 2 に時刻歴応答解析の解析条件を示す．

図 9 に各摩擦係数に対する Bi-STEM 先端変位の時刻歴応答曲線を示す．摩擦係数の違いにより振動波形が規則的に変化していることがわかる．

表 2　時刻歴応答解析の解析条件

固定端の拘束条件	根元部末端から Z = 100 [mm] の位置を完全拘束
シェル間摩擦係数 μ*1	0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0
初期変位y_0[mm]*2	-1.0
変位履歴*2	節点 P,Q（図 7 (b)）の Y 方向変位の平均値

*1 静摩擦係数と動摩擦係数はμで等しい

*2 変位は静的つり合い位置から計測

図 10 および図 11 に，振動周期および対数減衰率の摩擦係数依存性をそれぞれ示す．振動周期および対数減衰率の算出には，図 9 に示す時刻歴応答曲線の極大点 2 点(あるいは極小点 2 点)の時刻および変位を用いた．図 10 より，振動周期は摩擦係数の増加に伴って単調に減少することが分かる．これは，摩擦力によって接触面が固着し，梁の曲げ剛性が増加したためと予想される．また，図 11 より対数減衰率を極大にする摩擦係数が $\mu = 0 \sim 10$ の間に存在することがわかる．これは，摩擦係数が小さい場合には摩擦力が小さくなり，摩擦係数が大きい場合には固着する接触面の面積が増えるため，いずれの場合も（摩擦力）×（接触面の滑り速さ）で表されるエネルギー散逸率がモデル全体で小さくなることが要因と考えられる．

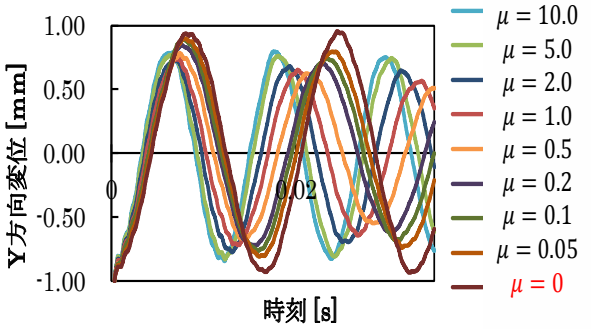


図 9　先端変位の時間履歴（初期変位$y_0 = -1.0$ [mm]）

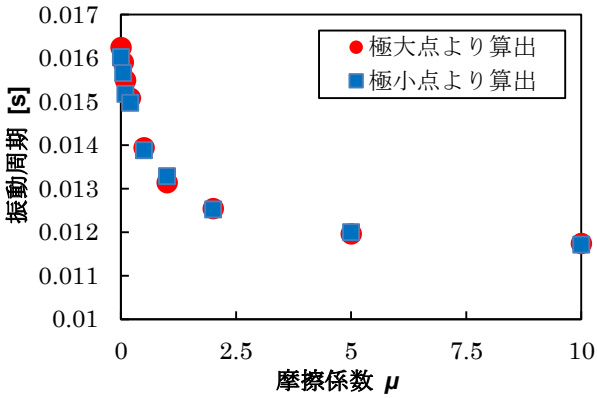


図 10　振動周期の摩擦依存性

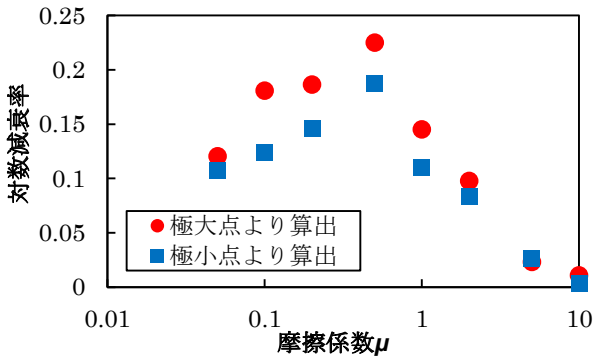


図 11　対数減衰率の摩擦係数依存性

5　Bi-STEM に関する研究のまとめ

非線形静解析により，固定端付近における断面形状の変化および内外シェル間の接触を考慮した Bi-STEM の静的形状を取得した．

得られた Bi-STEM 解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行い，自由減衰振動の変位履歴を求めた．その際，内外シェル間摩擦係数を変化させ，摩擦係数が Bi-STEM の振動周期や対数減衰率に及ぼす影響について調べた．その結果，振動周期は摩擦係数の増加に伴って単調に減少し，摩擦係数依存性は大きいことが分かった．また，対数減衰率はある摩擦係数($0<\mu<10$)で極大値をとることが分かった．

今後は，X 方向曲げ振動やねじり振動の時刻歴応答も求め，Bi-STEM の力学特性を詳細かつ体系的に検討可能な数学モデルを完成させる予定である．

6　SMA-BCON ブームの概要と研究目的

STEM ブーム同様に軽量かつ高剛性伸展ブームとして BCON ブームが近年開発され，盛んに研究されている．BCON ブームとは，コンベックステープ 2 枚を断面が楕円型になるように組み合わせ，その外周を収縮性と伸長性に優れた組紐によって拘束されたブームである．コンベックステープは組紐内で長手方向にスライドすることが可能なため，収納（巻き付け）時の周長差を許容しながらコンパクトに収納できることが特徴である．

また一般的なコンベックステープ（ばね鋼など）を用いた場合，収納時の弾性エネルギーを解放することで展開する．そのため，安定した展開を実現するためには断続展開（Step-wise Deployment）や減衰器などにより展開力を制御しながら展開する必要がある．また収納時の巻き付け部形状によって展開力は変化する．巻き付け部の形状が四角形の場合には，BCON ブームは四角形の頂点でのみ曲げられるため，一般的なコンベックステープを用いた場合には展開力のロスが懸念される．

そこで本章から第 9 章において，展開力の制御，また小型・超小型衛星のデ・オービット機構への応用を視野に入れて新たに考案した「SMA-BCON ブーム」について紹介する．

小型・超小型衛星の形状は，本衛星との相乗りや射出機構の制約から立方体が一般的であり，また衛星内部はミッション・バス機器で満たされデ・オービット機構を搭載するスペースが確保できないことを前提となる．そのため SMA-BCON ブームは衛星の外周に配置されると想定し，収納時の変形部（四角形の頂点部）にのみコンベックス形状の形状記憶合金（SMA）を適用し，四角形の辺に沿った直線部分は軽量化ブームとして設計した．これにより軽量化と展開力のロスが解決されると考えた．また形状記憶合金の形状回復力を用いて展開が行われるため，加熱量を制御することで展開力制御もかのうになる．以上をコンセプトとして考案した SMA-BCON ブームにおいて，実験室規模の概念モデルを製作し，展開実験を行うことで概念検証を行った．

7　SMA-BCOM ブームの概念モデル設計・製作

7.1　SMA-BCON ブームの概念モデル

SMA-BCON ブームの概要を図 12 に示す．変形部には Ni-Ti 合金の SMA を使用し，変形しない直線部にはアクリルの板材（板厚：3mm）を肉抜きして使用した．SMA はコンベックステープのように曲率断面を有する板材として形状記憶されている．今回用いた SMA の変態温度は約 60 度である．SMA とアクリル板は両面テープとカプトンテープで固定した．SMA とアクリル板の接合部寸法がブーム全体の曲げ剛性に影響を与えることから，自重を用いた簡易的な曲げ・ねじり試験により結合部の長さ，幅の寸法は決定した．SMA の加熱はニクロム線を用いた．高温接着性に優れた金属用接着剤で SMA の内壁にニクロム線を一筆書きの波状に接着した．また展開時の温度を計測するため，SMA 表面にシートタイプの熱電対を取り付けた．それらセンサーも含め組紐によって被覆することで SMA-BCON ブームの概念モデルを製作した．製作後の SMA-BCON ブームを図 13 に示す．

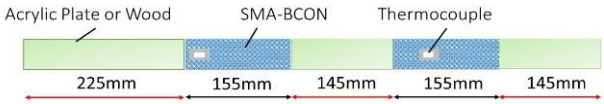
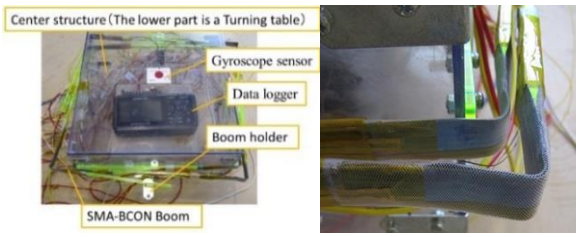


図 12　SMA-BCON ブームの概念図

図 13　製作後の SMA-BCON Boom

7.2　収納部の製作と展開構造物の概念モデル

収納部は 1 辺 30cm の正方形のボックスとし，塩ビ板（板厚：3mm）で製作した．展開力によるボックスの回転運動の影響を考慮し，ボックス底面にベニヤ板とスラストベアリングを用いて回転テーブルを設置した．ボックス内には熱電対用の計測ユニットとジャイロセンサーを設置した．製作した展開構造物の概念モデルを図 14 に示す．



(a) 実験装置の概要　　(b) ブーム収納状態

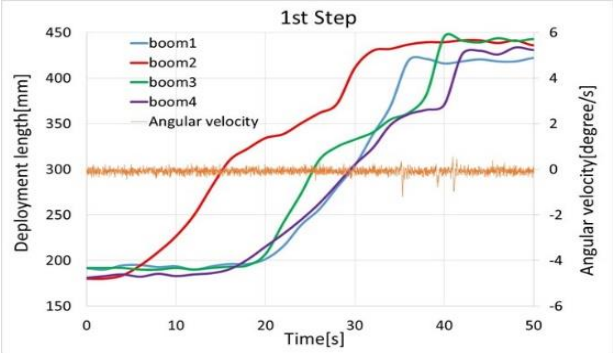
図 14　SMA-BCON ブームの展開実験モデル

8　SMA-BCON ブームの展開実験

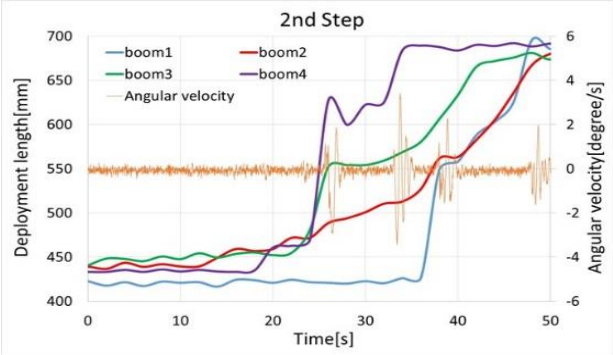
8.1　SMA-BCON ブームのみによる展開実験

7 章で述べた概念モデルを用いて展開実験を行った．図 12 にあるように，1 本のブームに SMA は 2 か所あるため 2 段階の展開となる．ブームは全部で 4 本あるため，SMA を加熱するニクロム線は全部で 8CH だが，直流電源の CH 数の上限から 4CH によって電力を供給した．ニクロム線と直流電源は並列に接続した．展開実験は，3 種類の供給電圧，電力を用いて行った．直流電源との配線方法，実験条件を表 3 に示す．また自重の影響を考慮し，展開時はひもでブーム先端を吊って実験を行った．展開実験の代表例として，10 [V]の電圧をそれぞれのニクロム線に供給して展開させた Case2 の結果を図 15 に示す．また図 16 に，展開時の SMA の温度変化を示す．図 15 において，横軸は時間，左縦軸はボックス中心からブーム先端までの距離，右縦軸にはジャイロセンサーで計測した中心構体の角速度を示している．

Case 1 は各所におけるニクロム線の抵抗値の違いを考慮して，ニクロム線に流れる電流が約 1 [A]になるように電圧を調整して展開させた．Case 2 は 10 [V]の一定電圧を供給し，Case 3 では 10 [W]の一定電力をニクロム線に供給した．それぞれの場合において，図 15 のように各ブームの展開長の実線が重なっている場合は同期展開，重ならない場合は非同期展開である．非同期展開の場合，ブームの展開時反力により中心構体が振動し，中心構体に角速度が生じていることが示されている（図 15 (b)）．図 15 (a)においては，ブーム長が短いため反力が小さいことも原因ではあるが，赤線で示した Boom 2 以外が同期的に展開しているため，展開完了時の反力が小さくなったと考えられる．



(a) 1段階目　展開



(b) 2段階目　展開

図 15　SMA-BCON ブームのみの展開実験結果（供給電圧：10V）

これらの考察は Case 1, 2, 3 のすべてに共通した結果である．また図 16 の温度変化を見ると，1 段階目の展開において Boom 3（緑色の実線）が，2 段階目展開において Boom 4（青色の点線）の温度が急激に高くなっている．その影響として温度が急上昇した 20 秒後以降，Boom 4 のみ他のブーム

表 3　ブームのみの展開実験における供給電圧，電力値

		1段階目		2段階目	
		Boom 1,2	Boom 3,4	Boom 1,2	Boom 3,4
供給電圧または電力	Case 1	6.3 V	8.0 V	7.6 V	7.3 V
	Case 2	10 V	10 V	10 V	10 V
	Case 3	10 W	10 W	10 W	10 W

より先に展開している．各ブームの温度変化に差が生じた原因としては，ニクロム線と直流電源の接続不良，またはニクロム線の接触によるショートなどが考えられるが，特定はまだできていない．

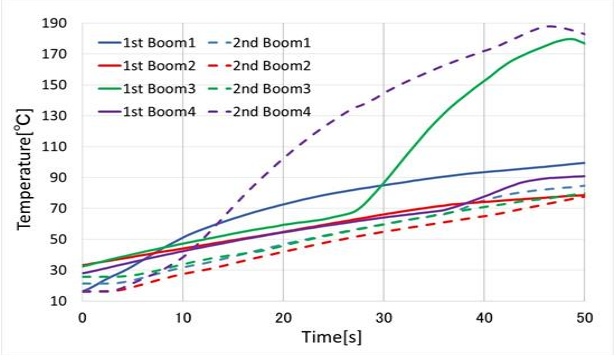
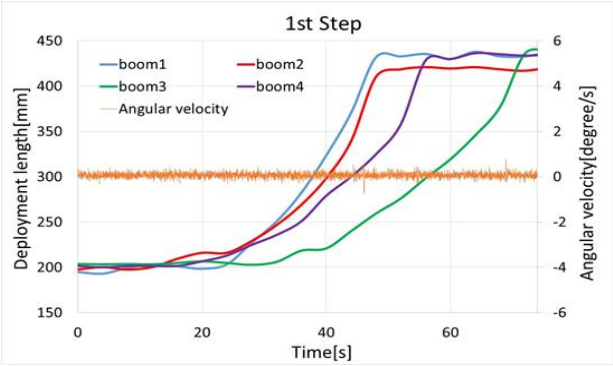


図 16　展開時の SMA の温度変化（供給電圧：10V）

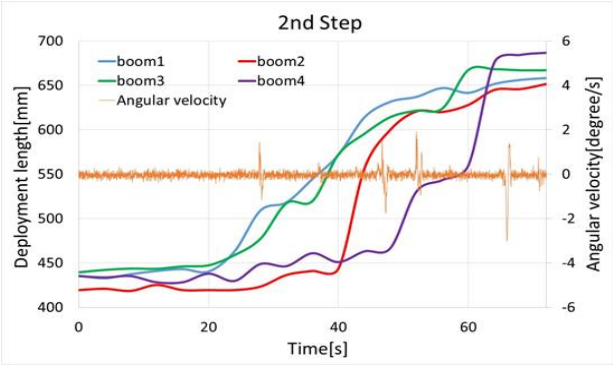
8.2　ブーム間をケーブルで繋いだ場合の展開実験

各ブームの非同期展開は，ブーム間に張られた膜面を介して同期展開に近づくと考えられる．そこで膜面を模擬したケーブルをブーム間に張り，非同期展開時に生じる張力の影響について展開実験により確認した．ブーム間に張るケーブルの本数（1，2，3 本の 3 パターン）をパラメータとして実験を行った．そのためニクロム線に供給する電力は一定とし，各ニクロム線に 1 [A]の電流が供給されるように設定した．ブーム間に 3 本のケーブルを張ったパターン 3 の展開挙動を図 17 に，また実験結果を図 18 に示す．

図 18 と図 16 の比較より，ブーム間をケーブルでつなぐことで 4 本のブームの同期性が向上したと考えられる．また展開の同期性はブーム間を結ぶケーブルの本数が増すごとに向上した．特に図 18 (b)の Boom 2（赤色）において，隣り合う Boom 1（水色）の展開が先に行われたことにより，Boom 2 の展開も同調したと考えられる．その挙動が図 17 (e), (f), (g) においても示されている．Boom 4（青色）においては，Boom 3 から張力が与えられケーブルが張った状態になっているが，展開の初期状態にその作用が働かなったために展開の終盤で Boom 3 に引き寄せられて急激に展開したと考えられる（図 18 (b) 50 ~ 60 [s]）．

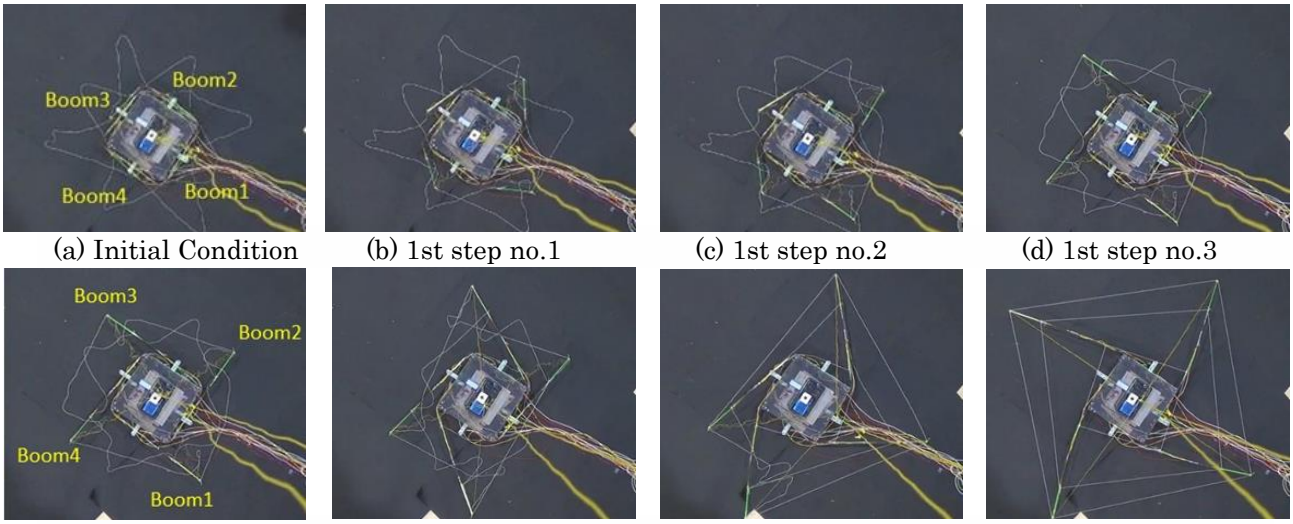


(a)　1 段階目　展開



(b)　2段階目　展開

図 18　展開実験結果（3 本のケーブルの場合）



(a) Initial Condition　(b) 1st step no.1　(c) 1st step no.2　(d) 1st step no.3

(e) 2nd step no.1　(f) 2nd step no.2　(g) 2nd step no.3　(h) 2nd step no.4

図 17　各ブームの展開挙動

9　SMA-BCON ブームに関する研究のまとめ

形状記憶合金の形状回復力を用いた展開力制御可能な BCON ブームとして，SMA-BCON ブームを提案した. 曲率を有する SMA 板材を 2 枚組み合わせ，その外周を組紐で被覆することで SMA-BCON ブームの概念モデルを製作した．また SMA-BCON ブームの利点を活かせる四角形中心構体の外周に収納した展開構造物の概念モデルを製作し，展開実証を行った．ニクロム線による SMA の加熱により, 収納状態から SMA-BCON ブームは展開し，各ブームの展開同期性と展開挙動について考察した．また膜面を模擬したケーブルをブーム間に張ることで，ブーム間の展開速度の差が緩和され，同期展開が促進されることも明らかになった．SMA の均等加熱と温度制御は今後の課題である．

10　おわりに

近年の宇宙構造物における高精度化と大型化の課題に対して，展開宇宙構造の観点から重要となる伸展ブームに着目した 2 つの研究について成果を示した．

Bi-STEM ブームについて，接触を考慮した非線形静解析によって，Bi-STEM の静的形状を取得した．また得られた Bi-STEM 解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行い，自由減衰振動の変位履歴を取得した．内外シェル間摩擦係数が Bi-STEM の振動周期や対数減衰率に及ぼす影響について解析的に考察し，摩擦係数依存性の影響が大きいことが明らかとなった．今後は，Bi-STEM の力学特性を詳細かつ体系的に検討可能な数学モデルの構築が課題である．

次に既存の組紐被覆コンベックステープブームの新たなタイプとして提案した SMA-BCON ブームについて，概念モデルの設計・製作と展開実験により概念検証を行った．展開実験を通した概念実証には成功した．SMA の加熱方法，加熱による形状回復力の制御，また各ブームが同期展開するための制御方法などは，今後の課題である．

文献

(1) Ken Higuchi et al.: Design and Evaluation of an Ultra-light Extendible Mast as an Inflatable Structure, AIAA 006-1809, SDM, USA, (2006.5).
(2) Ken Higuchi et al.: Verification of Practical Use of an Inflatable Structure in Space, Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol.7, No.ists26, pp.Tc7-Tc11, (2009).
(3) Yoshiro Ogi et al.: Effect of Attachment Errors of Flexible Appendages on the Spin Axis of a Rigid Body, Aerospace Technology Japan, Vol.10, No.ists28, pp.Pc_7-Pc_12, (2012.3).
(4) http://www-civ.eng.cam.ac.uk/dsl/research/sak/
(5) 渡邊秋人, 他,「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，2O07，2012 年 10 月，別府.
(6) 渡邊秋人，他，「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，2013 年 10 月，米子.