

円柱に巻き付けられたケーブルの繰り出し運動の ALE 法による定式化

Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation of Feeding Motion of Cable Wound Around Cylinder

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

片岡星太

Seita Kataoka

A winding storage type truss structure using self-extendible boom has high specific rigidity and storage ratio, and its deployment style is simple. Therefore, it can be expected to be applied to large-scale space structure in the future. This structure deploys by the self-extension force of the boom, but if the extension force is large, impact is applied to the member at deployment, if it is small, the structure will not overcome the frictional force and will not extend and even if it deploys it can lack the rigidity after deployment. Therefore, it is necessary to accurately model the actual phenomenon in the design of the self-deployable truss and to analyze deployment of the whole structure. In this paper, as a preliminary step, we will formulate the feeding motion of a boom with both ends wound around cylindrical shape by applying the ALE finite element method to the boom portion.

1. 序論

1.1. 研究の背景

近年、大型構造を用いた宇宙ミッションが提案・開発されている。十 m 級～数 km 級の大型宇宙構造を軌道上へ輸送する主な手段は、現時点ではロケットのみであり、輸送するためには構造物をフェアリング内部に収める必要がある。また、搭載可能な重量にも制限がある。よって、既存の輸送システムを用いて軌道上に大型宇宙構造を運ぶためには、展開構造を採用することが必須となる。

現在、展開構造に適用するために多くの構造様式が研究されている。具体的には、伸展部材とアクチュエータを組み合わせた機構による構造^[1]、展開トラス構造^[2]、インフレータブル構造^[3,4]、遠心膜展開^[5]、ラップリブ型の展開構造^[6]、展開パドル^[7]、巻き取り収納型^[8-12]や捻じり収納型^[13]、潰し収納型^[14]などの自己伸展部材を用いた構造がある。

著者らの研究室では、Fig. 1 に示すような、系外惑星の直接撮像による観測を目的としたスターシェードや、宇宙空間で太陽エネルギーを集め、地上へ伝送する宇宙太陽光発電システム (SSPS) の実用を目指している。

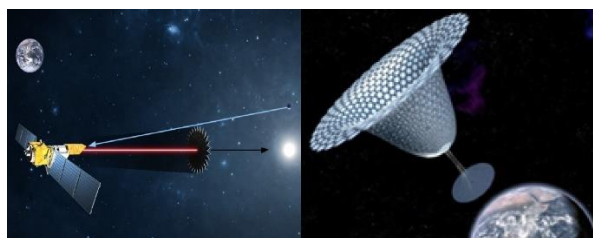


Fig. 1 Starshade^[15] (Left), SSPS^[16] (Right)

スターシェードや SSPS の機能要求は、比剛性、収納率、形状精度、モジュール構造への適用性が考えられる。そこで著者らは、前述した構造様式の中で、これらの機能要求を満たし、かつシンプルな展開様式という観点から、Fig. 2 に示すような、巻き取り収納型の自己伸展部材を用いた展開トラス構造により膜面を展開・展張する構造、すなわち、自己展開膜面トラスが適していると考え、1 本の部材の自己伸展運動やトラスの構成法に関する研究を行ってきた^[17,18]。

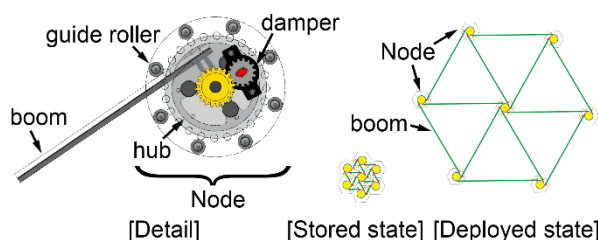


Fig. 2 Self-Deployable Structure using Self-extendible boom

Table. 1 Problems

Storage	Storability of multiple Nodes Design of hold-release mechanism
Launch	Resistance to launch vibration
Deployment	Strong impact on parts due to excessive extension force Design of damper mechanism to suppress the boom extension speed
After deployment	Vibration characteristics for control and orbital disturbance Design of latch mechanism to eliminate relative rotation of hub

しかし、この自己展開構造には、Table. 1 に示すような課題がある。特にブームの伸展力については、伸展力が大きいと展開完了時に部材に強い衝撃がかかり破壊する恐れがあり、小さいと摩擦に打ち勝てず伸展しなくなり、展開したとしても展開後の構造の剛性が不足する可能性がある。また、打ち上げ時の振動等の機械環境にも耐えうる設計にするために、ブーム・ダンパは適切なマージンをもった設計にする必要がある。

したがって、自己展開トラスの設計には、1 本の部材の伸展挙動だけでなく、Fig. 2 のノードやハブ、ならびに、膜も含めた全体構造の展開解析を行い、不具合モードとその発生条件を整理する必要がある。それには実際の現象を正確なモデル化が必須であり、具体的には以下の点を考慮しなければならない。

- 1) 1 本のブームの両端にノードが付いた構造のモデル化
 - 1-A) ブームの伸び、せん断、曲げ、ねじり変形
 - 1-B) ブームが繰り出る運動のハブに対する影響
 - 1-C) 巻き取り収納における、収納半径の変化
 - 1-D) ハブから離れるブームの剥離位置の変化
 - 1-E) ガイドとブームの間の接触力

- 1-F) ダンパによる摩擦力
- 1-G) 重力や空気抵抗力の考慮
- 2) 膜面を取り付けたトラス構造のモデル化
 - 2-A) 折り畳み形状
 - 2-B) 折り目剛性

この内、1-A)と1-B)については、ALE 有限要素法の適用が期待できる。これは、Fig. 2において、ブームとガイドローラーの接点を、ノードに固定された視点から見ることで定点とみなすか（オイラー法、有限体積法）、速度をもって伸展していくブームに固定した点を追従していくか（ラグランジュ法、有限要素法）によって、モデル化に一長一短があり、それらの中間の方法として、ALE 法 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian method) を用いることで、両者の欠点を解決できるためである。

1.2. 研究の目的および意義

前節までを踏まえ、本研究は、自己伸展部材と膜面による構造を用いたスターシェードやSSPSの設計のための展開挙動解析を目的とする。そこで、本論文では、その前段階として、両端を Fig. 2 のようなハブに巻き付けられた 1 本のブーム（以下、2N1B モデルと呼ぶ）の繰り出し運動を、回転運動の影響や、せん断・曲げ・ねじりを無視したケーブル要素とみなし、ALE 有限要素法を用いて定式化する。

この定式化によって、展開挙動予測コードを作成することで、円柱に巻き付けられたケーブルの繰り出し運動を解析することができる。この解析は、自己展開トラスの展開挙動のみでなく、宇宙用テザーの伸展挙動や、紡績技術などにも応用が可能であると考えられる^[19,20]。

2. 繰り出されるブームの運動方程式の導出

この節では、ハブから繰り出されるブームの運動方程式を、ALE 法に基づいて導く。まず、Fig. 3 と Table. 2 に示すように座標系と記号を定義する。

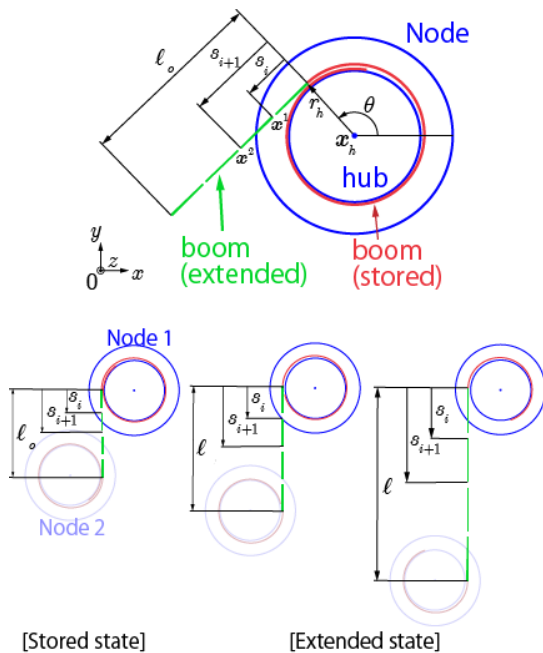


Fig. 3 Definition of coordinate system

Table. 2 Nomenclature

$\mathbf{x}_h$	Position vector of hub
θ	Rotation angle of hub
r_h	Radius of hub (= radius of stored boom)
ℓ_o	Initial length of extended boom
L_o	Natural length of boom
s_i	Embedded coordinates along undeformed boom
$\mathbf{x}$	Position vector of extended boom
N	Number of finite element division of extended boom
$\square_1, \square_2$	Value at Node 1 and Node 2, respectively

なお、Fig. 3 では理解のため巻き付けたブームを渦巻き形状として描いているが、Table. 2 にも示した通り、ブームの収納径はハブ半径と同じで一定であるものとしている。また、Fig. 3 は、伸展したブームを 4 要素に分割している例を示したものであり、ハブ 1 側から数えて 2 つ目の要素に関しての埋め込み座標と位置ベクトルの関係を表している。この図の通り、伸展中、ブームの要素数は変化せず、自然長が時々刻々変化するものとし、ALE 有限要素法により運動を定式化する。系における一般化座標は、ノード（およびハブ）の位置ベクトル、ノードの有限回転ベクトル、ノードに対するハブの相対回転角、ブームの節点の位置ベクトルと埋め込み座標である。

また、時刻を t 、数値解析における時間ステップ幅を Δt として、以下では次のような記号を用いる。

$$\begin{cases} \square_o = \square t & , \quad \square = \square t + \Delta t \\ \bar{\square} = \frac{\square + \square_o}{2} & , \quad \Delta \square = \square - \square_o \end{cases} \quad (1)$$

伸展したブームの埋め込み座標とハブの相対回転角度の関係は、2N1B モデルであることを考慮すると、節点 i ($1 \sim N+1$) の埋め込み座標 s_i は次式のように書ける。

$$s_i = s_i^{ref} + e_{1i}\theta_1 + e_{2i}\theta_2 \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} s_i^{ref} &= L_{o1} + l_o \frac{i-1}{N} \\ e_{1i} &= \frac{i-1-N}{N} r_{h1} \quad , \quad e_{2i} = \frac{i-1}{N} r_{h2} \end{aligned} \quad (3)$$

また、伸展したブームの 1 つの要素の位置ベクトルは次式のように書ける。

$$\mathbf{x} = N_p \mathbf{x}^p \quad (4)$$

ここで、 N_p は補間関数であり、以下のように書ける。

$$N_p = [N_i \quad N_{i+1}] = \begin{bmatrix} \frac{s_{i+1} - s}{s_{i+1} - s_i} & \frac{s - s_i}{s_{i+1} - s_i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$(s_i \leq s \leq s_{i+1})$

このとき、並進運動の運動エネルギーは次式のように書ける。

$$T = \frac{1}{2} M_{pq} \dot{\mathbf{x}}^p \cdot \dot{\mathbf{x}}^q + B_{pq} \dot{\mathbf{x}}^p \cdot \mathbf{x}^q + \frac{1}{2} C_{pq} \mathbf{x}^p \cdot \mathbf{x}^q \quad (6)$$

ただし、ドットは時間微分を表し、

$$\begin{cases} M_{pq} = \rho A \frac{s_2 - s_1}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \\ B_{pq} = b_{pq}^1 \dot{s}_1 + b_{pq}^2 \dot{s}_2 \\ b_{pq}^1 = \frac{\rho A}{6} \begin{bmatrix} 2 & -2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad b_{pq}^2 = \frac{\rho A}{6} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -2 \end{bmatrix} \\ C_{pq} = c_{pq} C \\ c_{pq} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad C = \rho A \frac{\dot{s}_1^2 + \dot{s}_1 \dot{s}_2 + \dot{s}_2^2}{3 s_2 - s_1} \end{cases} \quad (7)$$

である。なお、本稿ではブームをケーブル要素とし、回転運動に関する運動エネルギーを無視した。また、歪エネルギーは次のように書ける。

$$V = \frac{1}{2} EA (s_{i+1} - s_i) \left(\frac{|\mathbf{x}^2 - \mathbf{x}^1|}{s_{i+1} - s_i} - 1 \right)^2 \quad (8)$$

本研究では、運動解析にエネルギー・モーメント法（以下、EM法）を用いる^[21]。EM法では、1つのケーブル要素における両端の位置ベクトル $\mathbf{x}^p$ ($p=1,2$) およびハブ回転角 θ_α ($\alpha=1,2$) に関する運動方程式はそれぞれ、

$$\tilde{\mathbf{f}}_p^x - \tilde{\mathbf{F}}_p^x = \mathbf{0}, \quad \tilde{f}_\alpha^\theta - \tilde{F}_\alpha^\theta = 0 \quad (9)$$

となる。ただし、 $\tilde{\mathbf{F}}_p^x$ および $\tilde{F}_\alpha^\theta$ はそれぞれ $\mathbf{x}^p$ および θ_α に対応した一般化外力であり、 $\tilde{\mathbf{f}}_p^x$ および $\tilde{f}_\alpha^\theta$ は次式を満たす。

$$\Delta H = \Delta T + \Delta V = \tilde{\mathbf{f}}_p^x \cdot \Delta \mathbf{x}^p + \tilde{f}_\alpha^\theta \Delta \theta_\alpha \quad (10)$$

ただし、 $H = T + V$ は力学的エネルギー（ハミルトン関数）である。時間積分則として、以下の中間差分を用いると、

$$\bar{\square} = \frac{\Delta \square}{\Delta t} \quad (11)$$

式(6), (8)より、 $\tilde{\mathbf{f}}_p^x$ および $\tilde{f}_\alpha^\theta$ は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{f}}_p^x &= \bar{M}_{pq} \frac{\Delta \dot{\mathbf{x}}^q}{\Delta t} + \frac{\Delta M_{pq}}{\Delta t} \bar{\mathbf{x}}^q \\ &+ \bar{B}_{qp} \dot{\mathbf{x}}^q - \bar{B}_{qp} \bar{\mathbf{x}}^q + \frac{\partial B_{pq}}{\partial \dot{s}_\alpha} \frac{\Delta \dot{s}_\alpha}{\Delta t} \bar{\mathbf{x}}^q \\ &- \frac{c_{pq} \rho A}{3} \left(\frac{1}{s_{i+1} - s_i} \right) \\ &\times \left(\dot{s}_i \dot{s}_{oi} + \frac{\dot{s}_{oi} \dot{s}_{i+1} + \dot{s}_i \dot{s}_{oi+1} + \dot{s}_{i+1} \dot{s}_{oi+1}}{2} \right) \bar{\mathbf{x}}^q \\ &\mp \frac{1}{2} EA \left(N \frac{|\mathbf{x}^q - \mathbf{x}^p| + |\mathbf{x}_o^q - \mathbf{x}_o^p|}{\ell_o + \eta_{h1} \theta_{o1} + \eta_{h2} \theta_{o2}} - 2 \right) \\ &\times \frac{2\ell_o + \eta_{h1}(\theta_1 + \theta_{o1}) + \eta_{h2}(\theta_2 + \theta_{o2})}{2(\ell_o + \eta_{h1} \theta_1 + \eta_{h2} \theta_2)} \\ &\times \frac{(\mathbf{x}_o^q - \mathbf{x}_o^p)^T}{|\mathbf{x}^q - \mathbf{x}^p|} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{f}_\alpha^\theta &= -\frac{1}{2} e_{\alpha j} \frac{\partial M_{pq}}{\partial s_\alpha} \frac{\dot{\mathbf{x}}^p \cdot \dot{\mathbf{x}}_o^q + \dot{\mathbf{x}}_o^p \cdot \dot{\mathbf{x}}^q}{2} \\ &+ e_{\alpha j} \frac{\partial B_{pq}}{\partial \dot{s}_\alpha} \frac{\Delta \dot{\mathbf{x}}^p}{\Delta t} \cdot \bar{\mathbf{x}}^q + e_{\alpha j} \frac{\partial B_{pq}}{\partial \dot{s}_\alpha} \bar{\mathbf{x}}^p \cdot \frac{\Delta \dot{\mathbf{x}}^q}{\Delta t} \\ &+ \frac{1}{2} \frac{c_{pq} \rho A}{3} \left(\frac{1}{s_{i+1} - s_i} \right) \left\{ \left(2 \frac{\Delta \dot{s}_i}{\Delta t} + \frac{\Delta \dot{s}_{i+1}}{\Delta t} \right) \right\} e_{\alpha j} \bar{\mathbf{x}}^p \cdot \bar{\mathbf{x}}^q \\ &+ \frac{1}{2} \frac{c_{pq} \rho A}{3} \left\{ \frac{\dot{s}_i^2 - \dot{s}_i \dot{s}_{oi+1} + \dot{s}_{oi} \dot{s}_{i+1}}{2} + \frac{(s_{i+1} - s_i)(s_{oi+1} - s_{oi})}{\dot{s}_{i+1}^2 - \dot{s}_i \dot{s}_{oi+1} + \dot{s}_{oi} \dot{s}_{i+1}} \right\} e_{\alpha j} \bar{\mathbf{x}}^p \cdot \bar{\mathbf{x}}^q \\ &+ \frac{1}{2} \frac{c_{pq} \rho A}{3} \left\{ \frac{(s_{i+1} - s_i)(s_{oi+1} - s_{oi})}{-\dot{s}_{i+1} \dot{s}_{oi+1} - (\dot{s}_{i+1})^2 - \dot{s}_i \dot{s}_{i+1}} + \frac{(s_{i+1} - s_i)(s_{oi+1} - s_{oi})}{-\dot{s}_i \dot{s}_{oi} - (\dot{s}_i)^2 - \dot{s}_i \dot{s}_{i+1}} \right\} e_{\alpha j} \bar{\mathbf{x}}^p \cdot \bar{\mathbf{x}}^q \\ &+ \left\{ \frac{c_{pq} \rho A}{3} \frac{2\dot{s}_i + \dot{s}_{i+1}}{s_{i+1} - s_i} \right\} e_{\alpha j} \bar{\mathbf{x}}^q \cdot \frac{\Delta \dot{\mathbf{x}}^p}{\Delta t} \\ &+ \frac{1}{2} EA \left[N - \frac{2\ell_o + \eta_{h1}(\theta_1 + \theta_{o1}) + \eta_{h2}(\theta_2 + \theta_{o2})}{2} \right. \\ &\times \left(N \frac{|\mathbf{x}^q - \mathbf{x}^p| + |\mathbf{x}_o^q - \mathbf{x}_o^p|}{\ell_o + \eta_{h1} \theta_{o1} + \eta_{h2} \theta_{o2}} - 2 \right) \\ &\times \left. \frac{|\mathbf{x}^q - \mathbf{x}^p|}{(\ell_o + \eta_{h1} \theta_1 + \eta_{h2} \theta_2)^2} \right] \eta_{h\alpha} \Delta \theta_\alpha \end{aligned} \quad (13)$$

3. 2N1Bモデルの運動

前節の通り、ブームはALEケーブル要素とし、ノードとハブをそれぞれ剛体要素とする。

また、拘束条件は、ノードに対するハブの相対回転を1軸回転拘束、ハブに固定されたブームを点拘束とする。

1軸回転拘束について、ハブとノードの姿勢マトリクスをそれぞれ $\mathbf{R}_c, \mathbf{R}$ 、相対回転の回転マトリクスを $\mathbf{T}$ とすると、これらの関係は、

$$\mathbf{R}_c = \mathbf{R} \mathbf{T} \quad (14)$$

である。慣性座標系に対する回転マトリクスを $\mathbf{S}$ として、次式の関係

$$\begin{cases} \mathbf{R}_c = \mathbf{S}_c \mathbf{R}_{oc} & , \quad \mathbf{R} = \mathbf{S} \mathbf{R}_o \\ \mathbf{T} = \mathbf{T}_o \mathbf{S}_t & , \quad \mathbf{R}_{oc} = \mathbf{R}_o \mathbf{T}_o \end{cases} \quad (15)$$

のとき、

$$\mathbf{S}_c = \mathbf{S} \mathbf{R}_{oc} \mathbf{S}_t \mathbf{R}_{oc}^T \quad (16)$$

となる。このとき、 $\mathbf{S}_c, \mathbf{S}, \mathbf{S}_t$ を表す修正 Rodriguez ベクトルをそれぞれ $\mathbf{a}_c, \mathbf{a}, \mathbf{a}_t$ とすると、 $\mathbf{R}_{oc} \mathbf{S}_t \mathbf{R}_{oc}^T$ を表す修正 Rodriguez ベクトルが $\mathbf{R}_{oc} \mathbf{a}_t$ と表せるため、修正 Rodriguez ベクトルの関係式から $\mathbf{a}_c$ は、

$$\mathbf{a}_c = \frac{4\mathbf{a} + 4\mathbf{R}_{oc}\mathbf{a}_t + 2\mathbf{a} \times \mathbf{R}_{oc}\mathbf{a}_t}{4 - \mathbf{a} \cdot \mathbf{R}_{oc}\mathbf{a}_t} \quad (17)$$

となる。よって、仮想仕事の原理より、1 軸回転拘束による力学的エネルギーの変化は、

$$\begin{aligned} \Delta H &= \tilde{\mathbf{f}}_c \cdot \mathbf{a}_c + \tilde{\mathbf{f}} \cdot \mathbf{a} + \tilde{\mathbf{f}}_t \cdot \mathbf{a}_t \\ &= \tilde{\mathbf{f}} + \tilde{\mathbf{f}}_c \cdot \mathbf{a} \\ &\quad + \left\{ \tilde{\mathbf{f}}_t + \left[\frac{1}{4 - \mathbf{a} \cdot \mathbf{R}_{oc}\mathbf{a}_t} \mathbf{a}\mathbf{a}^T + 4\mathbf{I} + 2\hat{\mathbf{a}} \mathbf{R}_{oc} \right]^T \tilde{\mathbf{f}}_c \right\} \cdot \mathbf{a}_t \end{aligned} \quad (18)$$

となる。

点拘束は、Fig. 4に示すように、位置ベクトルを $\mathbf{z}$ で表せるような、拘束される剛体の、質量中心から見た拘束点までの距離を $\mathbf{y}$ とすると、慣性座標系から見た拘束点の位置ベクトル $\mathbf{x}$ は次式で表せられる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{z} + \mathbf{R}\mathbf{y} \quad (19)$$

よって、仮想仕事の原理より、

$$\begin{aligned} \Delta H &= \tilde{\mathbf{f}}_x \cdot \Delta \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{f}}_z \cdot \Delta \mathbf{z} + \tilde{\mathbf{f}}_\alpha \cdot \mathbf{a} + \tilde{\mathbf{f}}_q \cdot \Delta q \\ &= \tilde{\mathbf{f}}_x \cdot \Delta \mathbf{z} + \Delta \mathbf{R}\mathbf{y} + \tilde{\mathbf{f}}_z \cdot \Delta \mathbf{z} + \tilde{\mathbf{f}}_\alpha \cdot \mathbf{a} + \tilde{\mathbf{f}}_q \cdot \Delta q \\ &= \tilde{\mathbf{f}}_x \cdot \Delta \mathbf{z} - \bar{\mathbf{R}}\mathbf{y}\mathbf{a} + \tilde{\mathbf{f}}_z \cdot \Delta \mathbf{z} + \tilde{\mathbf{f}}_\alpha \cdot \mathbf{a} + \tilde{\mathbf{f}}_q \cdot \Delta q \\ &= \tilde{\mathbf{f}}_z + \tilde{\mathbf{f}}_x \cdot \Delta \mathbf{z} + \tilde{\mathbf{f}}_\alpha + \bar{\mathbf{R}}\mathbf{y}\tilde{\mathbf{f}}_x \cdot \mathbf{a} + \tilde{\mathbf{f}}_q \cdot \Delta q \end{aligned} \quad (20)$$

となる。

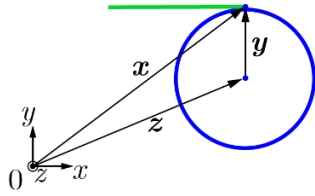


Fig. 4 Point constraint

4. 結論

本稿では、2N1Bモデルにおけるブームの繰り出し運動において、ブームをケーブル要素とみなし、ALE有限要素法とEM法を用いて定式化した。

今後は、実際にこれらの式を用いた展開挙動コードを作成し、1.1節にて述べた課題を解決していく。

謝辞

本研究は文科省・科研費 18H03817 の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] 荒木友太, ステム型開断面マストの構造特性に関する研究, 平成 20 年度日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2009 年
- [2] Shintate Kyoji, Terada Koji, Usui Motofumi, Tsujihata Akio, and Miyasaka Akihiro, Large Deployable Reflector (LDR), Journal of the National Institute of Information and Communications Technology Vol.50 Nos.3/4, 2003
- [3] 高橋裕介, 再突入ミッションにおける小型衛星の空力・空力加熱解析について, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, D06-1, 2015 年
- [4] 山田諭, インフレーターブルチューブを支持部材とする膜構造物の展開挙動, 平成 28 年度日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2017 年
- [5] 奥泉伸克, 白澤洋次, 宮崎康行, 森治, 小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の薄膜セイル展開挙動, 日本マイクロ重力ティ応用学会誌 Vol.29 No.1 2012, p48-55, 2012 年
- [6] Jianxin Yu, Huifeng Tan, Jianzheng Wei, Dynamic Testing of an Inflatable Wrap-rib Reflector Antenna, X International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2017, 2017
- [7] 島崎一紀, 中村徹哉, 住田泰史, 嶋田貴信, 川勝康弘, 薄膜セル応用軽量太陽電池パドル, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2014-4054, 2014 年
- [8] 大加瀬容平, 阿部尚大, 樋口健, 勝又暢久, 渡邊秋人, 二重薄肉開断面伸展梁(Bi-STEM)の接触解析による形状取得と力学特性, 第 56 回構造強度に関する講演会プログラム, 56, 2A01-2A01, 2014 年
- [9] 渡邊秋人, 伊藤裕明, 堀利行, 炭素繊維複合材料を用いた双安定性伸展ブームの検討, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2015-4083, 2015 年
- [10] 井上翔太, BCON ブームを用いた自己展開トラス構造の展開性評価, 平成 27 年日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2016 年
- [11] 田村明寛, バイコンバックスブームを用いた自己展開構造物の展開挙動, 平成 28 年日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2017 年
- [12] 福永桃子, 宮崎康行, 自己展開トラスの展開性向上, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2017-4701, 2017 年
- [13] Sergio Pellegrino, Deployable Structures in Engineering, DEPLOYABLE STRUCTURES, Chapter 1, p2-7, 2001
- [14] 渡邊秋人, 堀利行, 伊藤裕明, 弾性変形要素を有する折り畳み可能な自己伸展チューブの開発, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2018-4300, 2018 年
- [15] NASA, Exo-S: Starshade Probe-Class Exoplanet Direct Imaging Mission Concept Final Report, 2015
- [16] Mr. John C. Mankins, SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array (A 2011-2012 NASA NIAC Phase 1 Project) FINAL REPORT, 2012
- [17] 相浦啓司, 膜面宇宙構造物の伸展部材用コンバックステープの展開挙動に関する研究, 平成 24 年日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2012 年
- [18] 高坂大樹, 宮崎康行, 福永桃子, 河原林大思, スターシェードシステムに用いる自己展開膜面トラス構造の検討, 第 34 回宇宙構造・材料シンポジウム, B10, 2018 年
- [19] Michiel Kruijff, Erik J. van der Heide, Qualification and in-flight demonstration of a European tether deployment system on YES2, Acta Astronautica, 2008
- [20] 竹内秀年, 井上剛志, 高木賢太郎, ねじりを考慮した柔軟な糸の解舒運動のマルチボディモデリングと数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.860, 17-00436, 2018 年
- [21] Yasuyuki Miyazaki and Tsuyoshi Kodama, Formulation and interpretation of the equation of motion on the basis of the energy-momentum method, Journal of Multi-body Dynamics, Vol.218, No.1, pp.1-7, 2017