

## A02 構造座屈と不安定性の動力的評価手法の提案

有田祥子（日本大学大学院），宮崎康行（日本大学）

Shoko Arita (Graduate School, Nihon University), Yasuyuki Miyazaki (Nihon University)

### 1. 背景

宇宙機がより高度なミッションに挑戦するためには，大型アンテナやソーラーセイルなど展開宇宙構造物の構築技術が必要とされる．展開宇宙構造物の設計における重要な要求項目の一つに，展開再現性が挙げられる．2010年に打ち上げられた小型ソーラーセイル実証機 IKAROS では想定外の非対称展開が確認され，今後の展開宇宙構造物の開発に向けて再現性の評価法の確立および再現性の向上が課題として挙げられた．展開宇宙構造物の再現性に関する研究はこれまで，再現性を低下させる要因となる誤差や外乱を特定し，定量化し，モデル化して展開に与える影響を調べるという方法で行われてきた．しかしこの方法では実機設計の際，誤差や外乱のモデル化を誤ると結果が変わってしまうという問題がある．そこで本研究は，誤差をモデル化するのではなく，誤差や外乱に対するロバスト性の高い構造物を設計・選定するというアプローチで，展開再現性の高い構造物を設計する手法を提案することを目指す．

再現性を妨げる大きな原因の一つに，微小な誤差や外乱が大変位を生じさせる座屈現象が挙げられる．従って，誤差や外乱に対するロバスト性の高い構造物を設計・選定するには，座屈の起こらない構造を選定できればよいと考えられる．また，座屈の起こる構造しか選択肢がない場合，座屈による大変位の危険性，即ち不安定性を定量化し，その値を選定の判断基準とすれば設計に役立つと考えられる．更に，座屈を可視化して構造物のどの領域に大きな座屈変位が発生しうるかを視認できれば，対策を取るべき箇所を知ることができ，設計に役立つと考えられる．

構造解析において，座屈は構造物の剛性マトリクスの固有値に0や負値が現れることで検出でき，静解析ではこれを用いて様々な研究が行われている．一方，動解析では，座屈の他に剛体運動でも固有値が0や負になるため，座屈と剛体運動を区別できなければ座屈の検出が正しくできず，これを解決する方法は提案されていなかった．展開宇宙構造物は大きく運動しながら展開する物も多く，動解析で座屈を観測する技術が望まれる．動的座屈検出の手法として，動的座屈を静的座屈モードの線形和として表し，その係数推移を調べる方法が提案されている<sup>[1]</sup>が，この手法は初期形状から大きく変形していない場合においてのみ有効な手法であり，展開宇宙構造物のように時々刻々大きく変形する構造物には不向きである．また，動解析において座屈による不安定性を定量的に評価する研究は行われていなかった．そこで著者らはこれまでに，座屈と剛体運動を区別することで動解析中での座屈を検出し，定量化し，座屈を可視化する手法を提案した<sup>[2][3]</sup>．本報告では，実機を模した構造モデルに提案した手法を適用して座屈特性を考察した結果を述べる．

### 2. 座屈特性の考察に用いる座屈の評価値

本章では，著者らが提案した手法における座屈の評価値について説明する．これらの値を用いて次章で実機を模した構造モデルの座屈を定量的に評価し，座屈を可視化する．評価値は次の2つの量である．

#### ① DF 値 (Disturbance Force Value) :

座屈モード方向に変位を生じさせる外乱外力の最小値のノルム．0以上の実数として得られ，

DF 値が小さければ、微小な外乱で座屈変位を生じてしまうためより不安定、DF 値が大きければより安定に近いと評価する。DF 値は運動量と座屈モードのなす角に比例し、慣性力の大きさに比例する。

② **BD 値 (Buckling Displacement Value) :**

①の外乱外力が加わった場合の座屈変位の節点ごとのノルムを並べたベクトル。成分は 0 以上の実数として得られ、その値が大きければ外乱によって大きく座屈変位してしまうためより不安定、小さければより安定に近いと評価する。また、成分値の大きさに応じて各節点をコンター表示することで、構造座屈の発生および外乱が生じた場合の座屈変位の程度を可視化する。

### 3. 実機を模したモデルにおける座屈特性の考察

提案した理論を実際の宇宙展開構造物を模したモデルに適用し、構造物の座屈特性を調べた。用いたモデルは、パドル展開、ブームによる膜面展開、遠心展開膜の 3 つで、構造要素にはトラス・ケーブル要素、時間積分には Newmark- $\beta$  法を用いた。パドル展開とブームによる膜面展開は Fig.1 のような同一のモデル形状とし、解析諸元を異なるものとした。それぞれの解析諸元を Table 1 と Table 2 に示す。遠心展開膜のモデル形状は Fig.2 に、解析諸元は Table 3 に示すとおりである。座屈モードが複数ある場合、DF 値は各座屈モードに対して計算されるが、最も座屈しやすい状況を観察するために、最小の DF 値の推移を調べた、BD 値は最小 DF 値に対応する座屈モードに対して計算し、同様の理由で、成分のうち最大の値の推移を調べた。また、ブームによる膜面展開と遠心展開膜のモデルでは、ゴッサマー構造を表現するために圧縮剛性係数を 1 以下に設定し、部材が圧縮座屈歪を超えてたるみを生じている場合に部材を赤くコンター表示した。各モデルの展開の応答コンター図を Fig.3, 4, 5 に、各モデルの最小 DF 値の推移および最大 BD 値の推移を Fig.6- Fig.13 にそれぞれ示す。なお、Fig.8 は、Fig.6 の縦軸の最大値を  $1.4 \times 10^{-3}$ [N]とした拡大図、Fig.9 は Fig.7 の縦軸の最大値を  $5 \times 10^{-3}$ [N]とした拡大図である。

まずパドル展開モデルについて、Fig.6 を見ると Step3700 を超えたあたりから DF 値は急激に大きな値を取っており、Fig.10 を見ると、Step3700 以降 BD 値は比較的小さい値を取りつづけている。即ち、Step3700 以降、展張に近づくほど構造形状が安定化していくという傾向が得られた。Step3700 以降の応答形状は、展開後のフラットな形状に近くなっており、いわば全てのヒンジが開いた状態に近い状態のため、大変位が生じにくいと考えられる。一方 Step3700 より前は、一部のヒンジが閉じた状態に近く、それらのヒンジが開くことに伴う節点変位が、既に開いた状態に近いヒンジに飛び移り座屈を起こさせるような現象が起こっていることが考えられる。即ち、展開中の至る所でヒンジがばたつくような振動を起こし得ると考えられる。Fig.3 を見ると、黄色い節点が時折見られ、ヒンジのばたつきが生じ得る箇所が確認できる。しかし、Fig.10 から分かる通り、剛なパドルでは BD 値が小さい。よって剛なパドル展開は構造座屈が起こったとしても、短時間で大きく構造形状を変えるような影響は及ぼさないと考えられる。

次にブームによる膜面展開モデルについて、Step3700 以降 DF 値が急激に大きくなる傾向はパドルのモデルと同様であり、展張状態に近づくほど安定化する傾向が得られた。しかし、その数値はパドルのモデルと比べると非常に小さい。また、Fig.10 と Fig.11 を比較すると、Step3700 より前の BD 値はパドルのモデルよりもやや大きい値に分布している。これは、座屈変位がパドルのモデルより大きいことを示している。これらのことから、ゴッサマー構造物は構造座屈を起こしやすいと言える。一方で Step3700 より前の DF 値について Fig.8 と Fig.9 を比較すると、パドルのモデルと比べてやや大きい値に分布して

いることが分かる。これはゴッサマー構造物が座屈しやすい傾向と反するように見えるが、Fig.4を併せて見ると、パドルのモデルに比べて大きく運動する応答となったため、その慣性項の影響が大きく、DF値が大きい値を示したものと考えられる。

最後に遠心展開膜について、Fig.5を見ると、大きな座屈変位が生じるのは殆どがテザー部分であった。テザー部分は圧縮剛性係数を小さくしたため、より柔軟な部材となっており、それが大きな座屈変位を示す理由であると考えられる。Fig.12を見ると、他の解析モデルの結果より大きいDF値が出ている。これは膜面が中心剛体の回転によって運動していることで大きな慣性項の影響が出たものと考えられる。Fig.13を見ると他の解析モデルより大きいBD値が出ているが、殆どがテザー部分の節点の座屈変位のBD値を取ったものとみられ、柔軟な構造であるため大きなBD値が出たと考えられる。

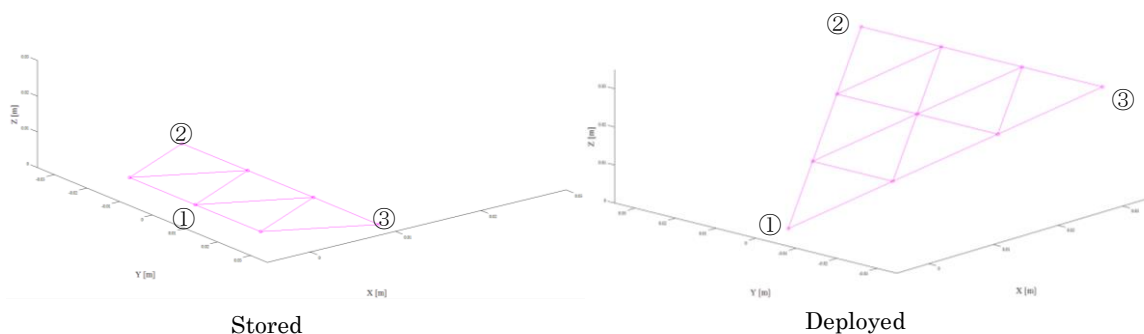


Fig.1 パドル展開およびブームによる膜面展開の解析モデル形状

Table 1 パドル展開の解析諸元

パラメータ	記号	数値	単位
時間刻み幅	$dt$	$5 \times 10^{-4}$	[s]
ヤング率	$E$	70	[GPa]
密度	$\rho$	2.7	[g/cm <sup>3</sup> ]
部材断面積	$A$	$4 \times 10^{-8}$	[m <sup>2</sup> ]
強制変位の増加率	$\Delta z$	$1.5 \times 10^{-2}$	[m/s]
圧縮剛性係数	$\alpha$	1	[-]
展開条件	節点①を完全固定し、1ステップあたり $\Delta z$ ずつ、節点②と③を $z$ 方向に強制変位させる		

Table 2 ブームによる膜面展開の解析諸元

パラメータ	記号	数値	単位
時間刻み幅	$dt$	$5 \times 10^{-4}$	[s]
ヤング率	$E$	3.5	[GPa]
密度	$\rho$	1420	[g/cm <sup>3</sup> ]
部材断面積	$A$	$9.37 \times 10^{-9}$	[m <sup>2</sup> ]
強制変位の増加率	$\Delta z$	$1.5 \times 10^{-2}$	[m/s]
圧縮剛性係数	$\alpha$	0.4	[-]
展開条件	節点①を完全固定し、1ステップあたり $\Delta z$ ずつ、節点②と③を $z$ 方向に強制変位させる		

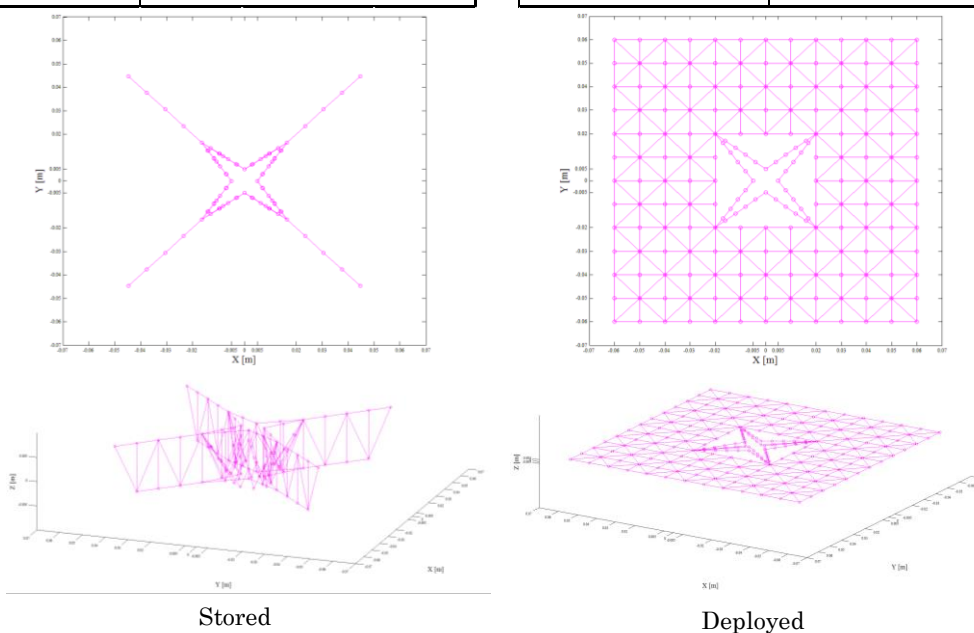


Fig.2 遠心展開膜の解析モデル形状

Table 3 遠心展開膜の解析諸元

パラメータ	記号	数値	単位
時間刻み幅	$dt$	$5 \times 10^{-4}$	[s]
ヤング率	$E$	膜3.5, テザー100	[GPa]
部材断面積	$A$	$9.375 \times 10^{-9}$	[m <sup>2</sup> ]
テザー半径	$r$	$0.73 \times 10^{-3}$	[m]
密度	$\rho$	膜1420, テザー1240	[g/cm <sup>3</sup> ]
角速度	$\omega$	5	[rad/s]
圧縮剛性係数	$\alpha$	膜0.4, テザー0.01	[-]
先端マス	$m$	$3.673 \times 10^{-3}$	[kg]
		膜面の四隅に配置する	
展開条件	角速度 $\omega$ で中心剛体に接するテザー先端の節点を強制回転させる		

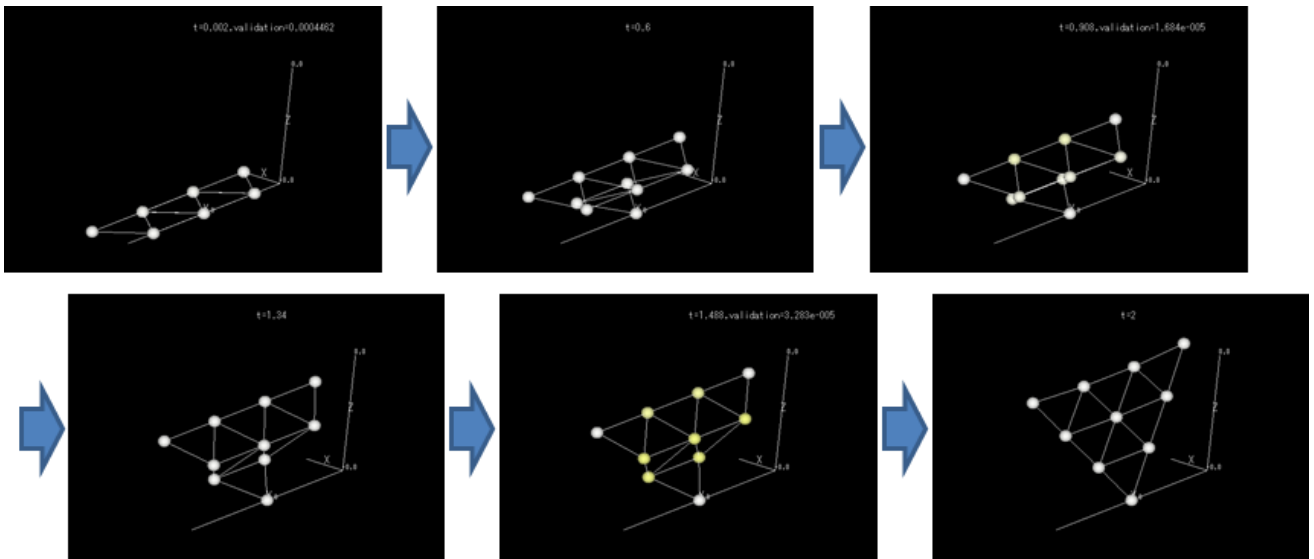


Fig.3 パドル展開の応答コンター図

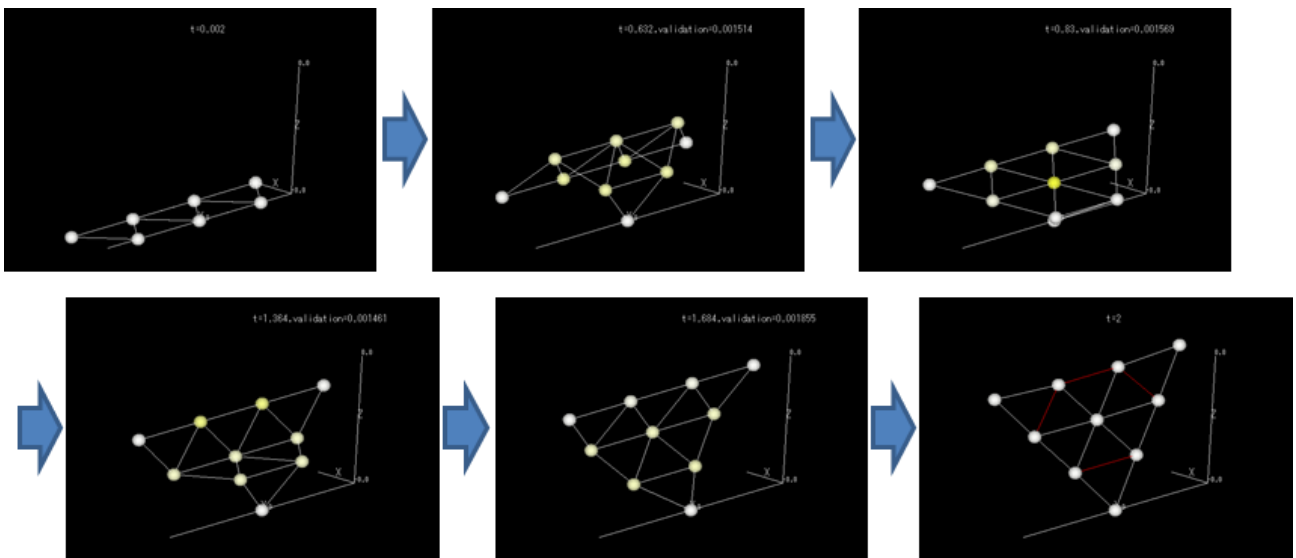


Fig.4 プームによる膜面展開の応答コンター図

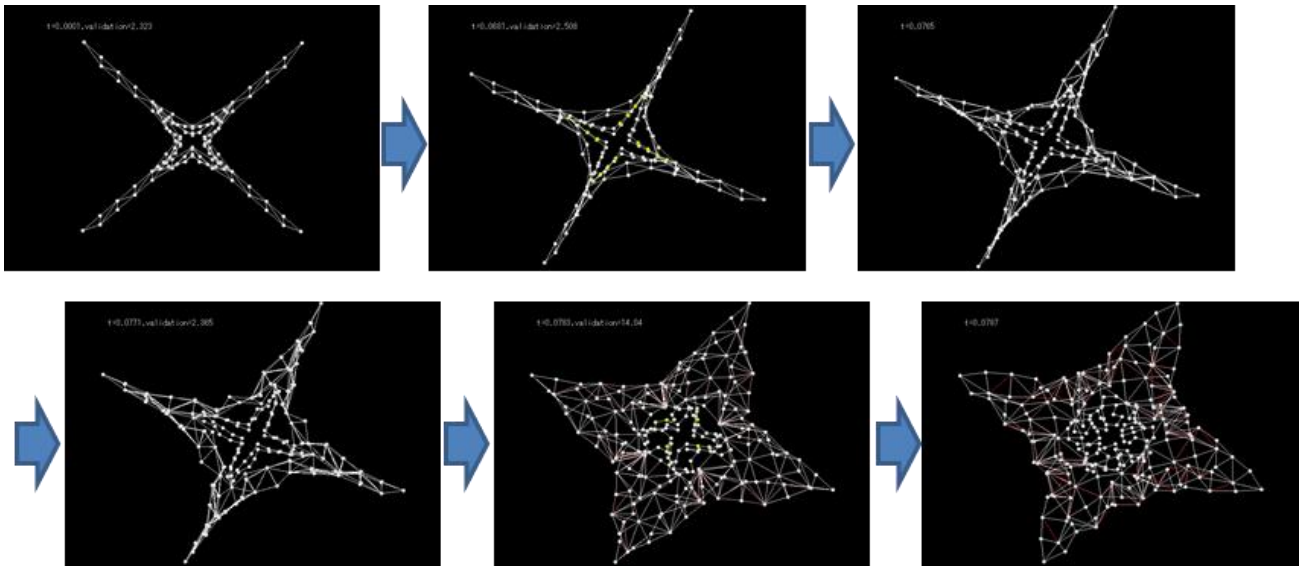


Fig.5 遠心展開膜の応答コンター図

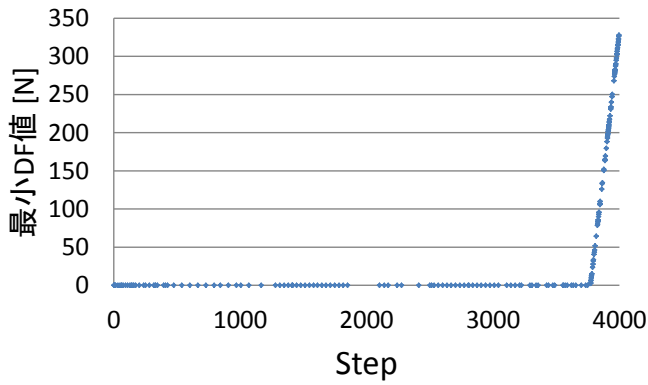


Fig.6 パドル展開の最小 DF 値の推移

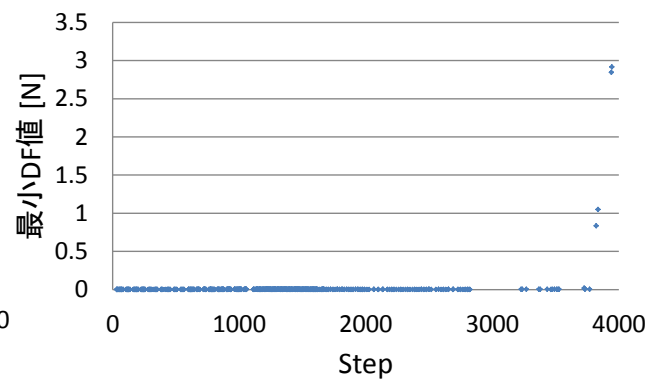


Fig.7 ブームによる膜面展開の最小 DF 値の推移

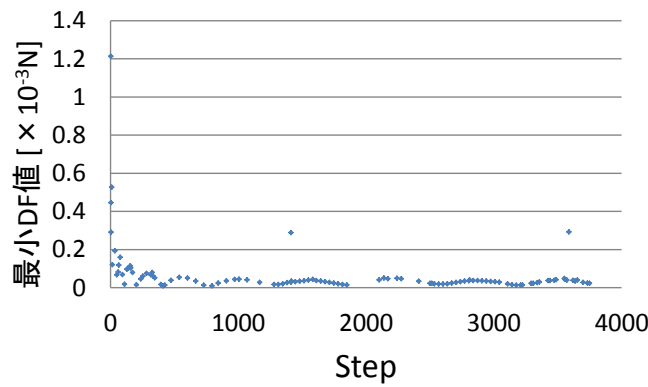


Fig.8 パドル展開の最小 DF 値の推移の拡大図

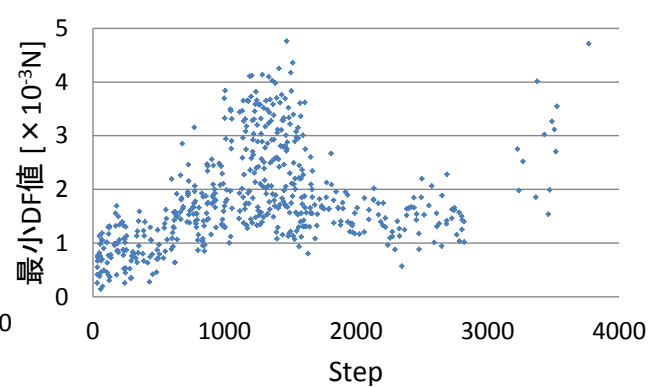


Fig.9 ブームによる膜面展開の最小 DF 値の推移の拡大図

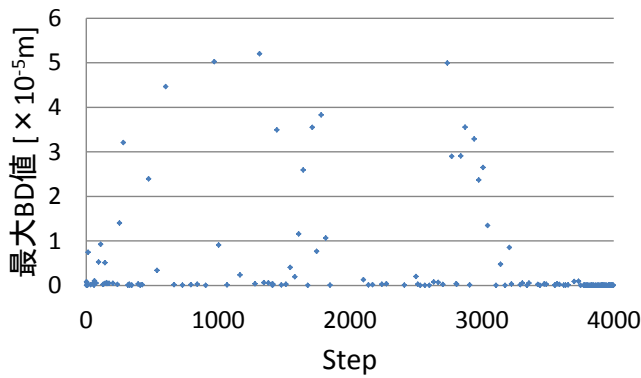


Fig.10 パドル展開の最大 BD 値の推移

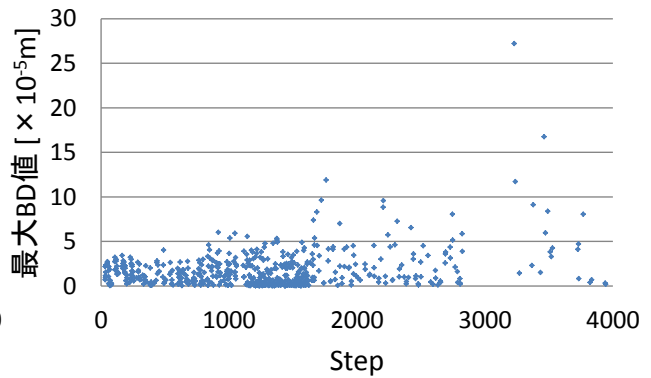


Fig.11 ブームによる膜面展開の最小 DF 値の推移

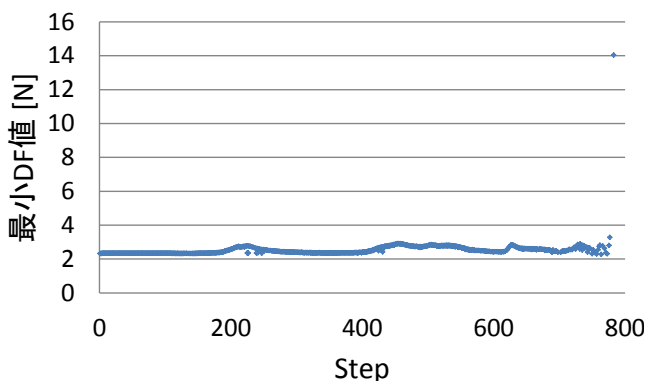


Fig.12 遠心展開膜の最小 DF 値の推移

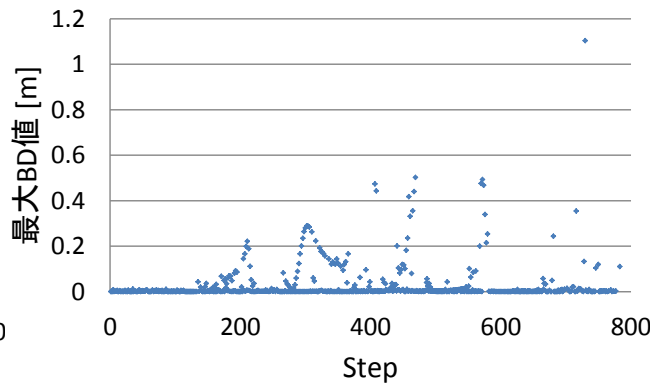


Fig.13 遠心展開膜の最大 BD 値の推移

#### 4. まとめ

本研究は、展開構造物の展開再現性を妨げる大きな原因の一つである座屈現象に注目し、座屈の起こらない構造物、座屈が起きたとしてもそれによる大変位の危険性が低い構造物を選定できるようにし、更に、座屈を可視化して大変位の危険性のある構造領域を視認できるようにする手法の構築を目指すものである。本報告では著者らがこれまでに提案した座屈の検出手法、定量化手法、可視化手法を、実機を模したモデルに適用し考察することで、提案した手法が実機設計にも利用できることを確認した。

また、提案した手法の利用方法として、①展開方法の選定時に、座屈の有無を調べる、②展開方法の選定時に、より大きい DF 値・より小さい BD 値の展開方法を採用する、③大きい BD 値を示す構造領域を調べ、対策を取る、④コイラブルマストのように座屈を利用した展開をする場合には、小さい DF 値を示すことを確認する（小さい DF 値を示せば、狙った座屈を生じさせることができている）、⑤新たなゴッサマー展開構造様式の座屈特性の評価、などに利用していくことができると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 根本圭一, 粕谷平和, “周期的軸圧縮不可を受けるアングルプライ積層円筒殻の動的安定性”, 日本材料学会, 材料, Vol. 46, No. 5, pp 544-550, 1997.
- [2] Arita, S. and Miyazaki, Y., “A study of dynamic evaluation of structural buckling”, Mechanical Engineering Letters (Submitted), The Japan Society of Mechanical Engineering.
- [3] 有田祥子, “構造座屈と不安定性の動力的評価法”, 日本大学大学院博士論文, 2016, (審査中)