

宇宙展開膜面構造物の収納時逆折れ挙動の 解明とその対策

阿部雅人¹・名取通弘²・樋口健³・塩竈裕三⁴

¹正会員 Ph.D. 東京大学講師 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

²工博 宇宙科学研究所教授 (〒229 神奈川県相模原市由野台 3-1-1)

³工博 宇宙科学研究所助教授 (〒229 神奈川県相模原市由野台 3-1-1)

⁴学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

宇宙構造物の建造にはロケット等による輸送が前提となるため、軽量でかつ畳み込みやすい膜面やケーブル等の柔軟な構造形式が適している。一方、宇宙空間において構造部材の再利用を行ってコストダウンを図り、さらに構造物を大型化していくためには、一度展開した構造物を再び収納する技術が重要である。そこで、本研究では、宇宙実験・観測フリーフライヤー (SFU) 回収時の太陽電池アレイ収納不良を対象として取り上げ、柔軟な膜面展開構造物の収納時挙動を実験・解析の両面から検討した。その結果、SFU 回収時の収納不良は、展開時と収納時で変形経路が異なる一種の飛び移り現象 (snap-through) によるものであることが明らかになった。さらに、解析に基づいて、この現象に対する構造的対策を提案した。

Key Words: microgravity experiment, retrieval, reverse folding, space membrane, snap-through

1. はじめに

宇宙構造物の建造にはロケット等による輸送が前提となるため、軽量でかつ畳み込みやすい構造形式が適している。そこで、膜面やトラス構造をはじめとした各種の展開構造形式や、状況に応じて形態を変えることが可能な適応型の構造物等が提案され、盛んに研究されている^{1),2)}。さらに、近年、スペースシャトルの登場を受けて、展開して一度使用した後に再度回収・収納して構造物を再利用する試みもなされている。このように、一度打ち上げた構造物を多目的に再利用することによって、宇宙開発に対する厳しい制約となっている輸送コスト³⁾が大幅に削減されるものと期待される。したがって、回収・再利用技術は、将来の大型宇宙構造物や宇宙インフラストラクチャー⁴⁾の建造を支える重要な基盤技術となる。ところが、構造物の展開挙動に関する研究は数多く行われてきたものの、収納挙動は比較的新しい問題でもあることから、詳細な検討はなされておらず、単に展開を逆にしたプロセスであると想定されてきたのが現状である。

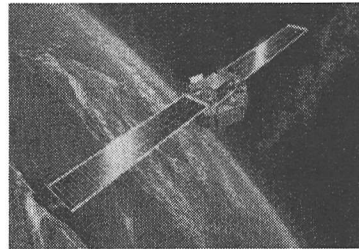


図-1 宇宙実験・観測フリーフライヤー (SFU)⁵⁾

我が国においても、図-1に示す1995年3月18日に打ち上げられた宇宙実験・観測フリーフライヤー (SFU: Space Flyer Unit) については、1996年1月20日にスペースシャトルエンデバー号によって回収が試みられている。しかし、その際、衛星本体の回収には成功したものの、SFU 付属の長さ 24.4[m]、幅 2.36[m]の太陽電池アレイは、動作不良によって収納できなかった⁶⁾。それは、太陽電池アレイの収納時に、展開時とは全く異なる予想外の変形性状が生じたためである。

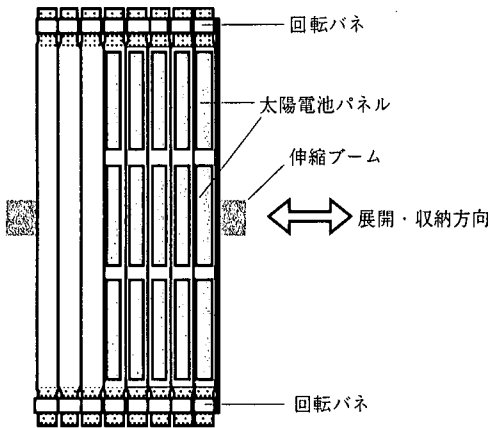


図-2 太陽電池アレイの構造

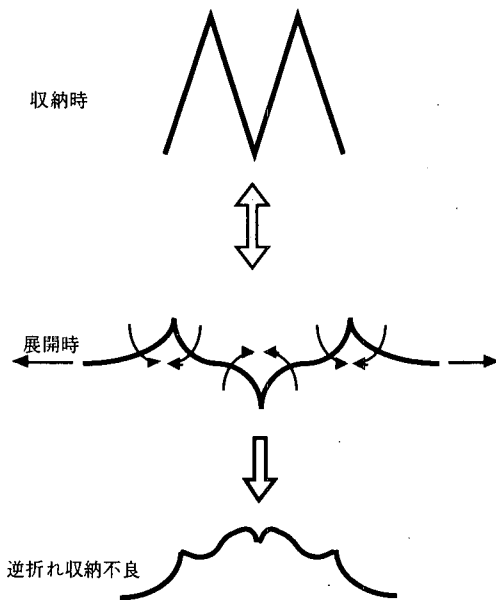


図-3 展開・収納時の変形

SFUの太陽電池アレイの構造を模式的に図-2に示す。重量を低減するためアレイ本体は極柔軟な膜面構造であり、衛星本体近傍で太陽光があたりにくい部分を除いては、太陽電池パネルが装着されている。アレイ最先端のパネルは、電動の伸縮ブームと接合しており、アレイ全体がブーム伸縮に伴って展開・収納される。収納時には、図-3の展開時の図に示したように、アレイ両端の回転ばねによってつけられた変形の「くせ」によって展開前と同じ方向に折れ込む予定であった。展開の際は屏風が開くように伸展し、収納の際は丁度その逆のプロセスで閉じ

るという設計である。しかしながら、実際の収納時には、太陽電池パネルが装着されていない部分が、図-3の下の方のように想定と逆に折れ込んだため収納が不可能となった。なお、SFUの実物大太陽電池アレイを用いた打ち上げ前の地上試験では、この逆折れ現象は観察されていない。したがって、逆折れは地上重力環境では発現せず、微小重力環境において顕在化する変形モードであると考えられる。

この例では、太陽電池パネルが装着されていない部分が逆折れし、装着されている部分は正常収納されたことから、アレイの剛性が低い部分で問題が生じたことになる。したがって、経験的には、衛星本体近傍の太陽電池パネル不装着部分に対してもダミーのパネルを装着して剛性を高めることで逆折れの防止が可能であると予想される。しかしながら、この対策は、今回の経験のみに基づくものであり、その有効性を説明する力学的原理が不明確であるので、どの程度の汎用性を持つ対策であるのかが明らかでない。また、輸送を考えると、この方法は重量の増加をもたらすため、必ずしも望ましい解決法とはいえない。

そこで、本研究では、膜面展開アレイ収納時の逆折れ現象の力学的原理を明らかにし、効率的な構造的対策を導くことを目的として、実験・解析の両面から検討を行う。その際、膜面構造は柔軟なため重力の影響を受けやすいこと、ならびに、SFU打ち上げ前の地上試験では逆折れが観察されなかったことを踏まえ、解析検討に先立って無重力環境における小型模型実験を行った。次いで、実験結果に基づいて定性的な特性の理解を深めた上で、エネルギー法を適用した簡易解析を行い、その基本的特性を検討する。さらに、解析に基づいて、重量増加をもたらさない構造的対策の可能性を検討する。

2. 無重力実験による現象の再現

SFUアレイの逆折れ現象は地上試験では観察されておらず、実験的には再現されていないため、変形形状や変形生成の様子など定性的な特性についても不明な点が多い。そこで、解析に先立って、逆折れを実験的に再現し、さらに変形形状など解析の基礎となる特性を把握することを目的として、無重力環境において小型の膜面模型の収納実験を行った。

(1) 実験概要

実験は、北海道上市川町の炭坑跡を利用した無重力実験施設⁷⁾を使用して行った。

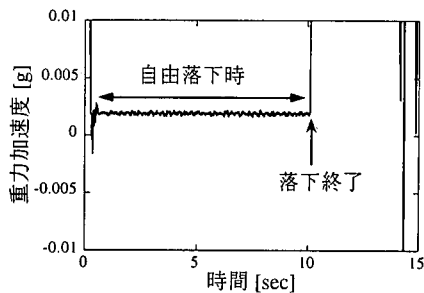


図-4 実験時の無重力環境

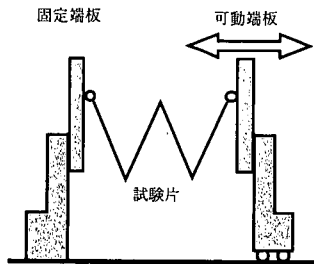
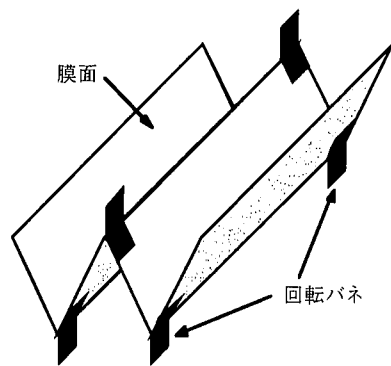


図-5 展開・収納装置の概要

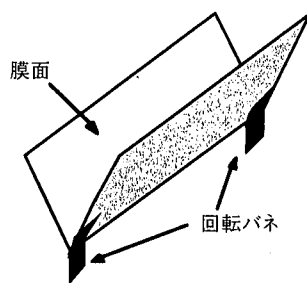
当施設は、自由落下距離が490[m]の縦坑において実験装置を格納したカプセルを落下させることで、図-4に示すような10秒間程度の安定した微小重力環境を供給するものである。実験は、膜面模型を展開した形で格納カプセル内にセットし、落下開始と同時に収納挙動を開始するという手順で行った。収納挙動は、カプセル内に設置した8ミリビデオ撮影によって記録した。なお、実験は、施設使用スケジュールの都合上1996年9月に4回、12月に3回の2シリーズに分けて計7回行った。

展開・収納は、図-5に示したように、膜面模型を設置した端板を移動させることで模擬した。膜面模型の概要は図-6および表-1に示したとおりである。膜面模型の寸法は、収納カプセル内で使用可能なスペースが制約されていることから定まったものである。また、模型に用いた材料の物性値による制約もあったため、実物のSFUアレイの相似を満たした縮小模型とすることが出来なかった。したがって、本実験は、SFUアレイの逆折れ現象の定量的かつ精密な再現を目指したのではなく、定性的な現象の再現を意図したものである。

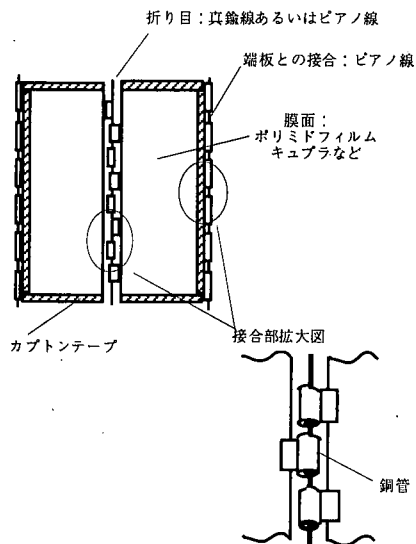
膜面模型はポリミドフィルムや布を重ねたものであるから非常に柔軟であり、重力環境では常に重力の方向に大きくたわむ。そのため、重力環境での予備実験では膜面の変形は重力の方向で定まり、無重力環境での逆折れ発生を予測するのは困難であった。



(a) 4つ折り収納モデル



(b) 2つ折り収納モデル



(c) 2つ折り収納モデルの詳細

図-6 膜面模型の概要

表-1 膜面模型一覧

(a) 4つ折り収納モデル (第1シリーズ)

	膜面模型 No.1	膜面模型 No.2	膜面模型 No.3	膜面模型 No.4
寸法 (奥行き×幅)	280×300 [mm]	240×300 [mm]	280×300 [mm]	240×300 [mm]
膜面の材質	ポリミドフィルム (厚さ 50 [μm])	布 (厚さ 330 [μm])	ポリミドフィルム (厚さ 50 [μm])	布 (厚さ 330 [μm])
折り目の構造	切れ目を入れて折れ やすくしてある	φ 0.6 [mm]のピアノ 線を縫い込む	切れ目を入れて折れ やすくしてある	φ 0.3 [mm]のピアノ 線を縫い込む
回転バネの構造	30 [mm]×15 [mm] 4 枚重ね	30 [mm]×15 [mm] 4 枚重ね	30 [mm]×15 [mm] 4 枚重ね	30 [mm]×15 [mm] 4 枚重ね
備考			試験片 No.1 の折り目 中央に回転バネ設置	
実験結果	膜面中央で逆折れ	正常収納	正常収納	正常収納

(b) 2つ折り収納モデル (第2シリーズ)

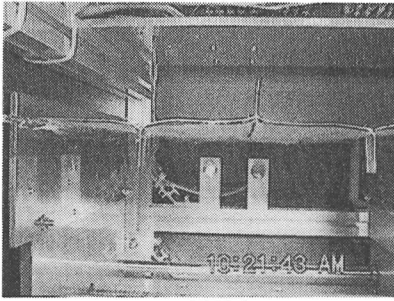
	膜面模型 No.5	膜面模型 No.6	膜面模型 No.7
寸法 (奥行き×幅)	120×300 [mm]	120×300 [mm]	120×300 [mm]
膜面の材質	キュブラ (厚さ 75 [μm])	キュブラ (厚さ 75 [μm])	キュブラ (厚さ 75 [μm])
折り目の構造	φ 0.3 [mm]の真鍮線 を内径 1 [mm]の銅パイ プに通したヒンジ	φ 0.3 [mm]の真鍮線 を内径 1 [mm]の銅パイ プに通したヒンジ	φ 0.3 [mm]の真鍮線 を内径 1 [mm]の銅パイ プに通したヒンジ
回転バネの構造	30 [mm]×10 [mm] 6 枚重ね	50 [mm]×15 [mm] 1 6 枚重ね	30 [mm]×10 [mm] 1 6 枚重ね
備考			
実験結果	正常収納	正常収納	膜面全体で逆折れ

そこで、図-6 (a), (b), および表-1 に示すような、4つ折りおよび2つ折りの、剛性を変化させた7つの膜面模型を用意し、試行錯誤的に落下実験を行うことによって現象の再現を試みた。膜面の端部はカプトンテープで補強した上、OHP シート (厚さ 100 [μm]) を重ね合わせて作った板バネからなる回転バネを取り付けている。なお、端板と膜面、および膜面相互の接合には、モーメントを加えず鉛直変位を拘束するよう配慮し、図-6 (c) のようにピアノ線や真鍮線を銅管に通したヒンジを用いた。

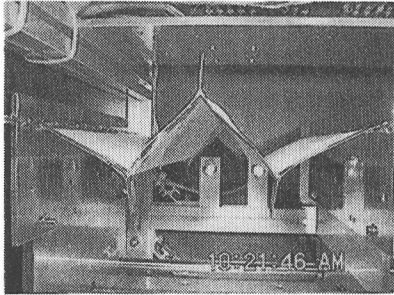
第1シリーズの実験では、端板への取り付け状況に伴う境界条件の差異の影響を除くことを意図して、4つ折り模型を採用した上で、中央2面の挙動を観察することとした。図-7 に正常収納された模型 No.2 の無重力収納挙動を示す。左右端板のヒンジの微小な摩擦の影響で両端の膜面の運動が拘束されるため、図-7 (b) からわかるように中央の2面が先行して畳

まれ、その後に両端2面が収納されるという2段階の収納挙動が生じた。それに対して、実機のアレイでは各面が一様に収納されているものと考えられる。そこで、第2シリーズの実験では、この段階的収納による全体挙動への影響を避けるため、中央2面のみ取り出した2つ折り模型を採用することとした。

なお、重力環境で行った予備実験では、重力の影響が大きいため、端部の微小な摩擦の影響は全く表れず、4つ折り模型における中央2面と両端2面の段階的な収納は全く予想外の挙動であった。このように、無重力環境では、重力の影響の下では無視して差し支えない微小な摩擦等が、構造物の力学的挙動に大きな影響を与える。この点が、重力環境での観察から無重力環境における挙動を予測する際の最大の難点であり、無重力環境での構造物の挙動実験が必要とされる一つの大きな理由であると考えられる。



(a) 展開時



(b) 収納開始時



(c) 収納時

図-7 模型 No.2 の無重力収納時挙動

(2) 実験結果および考察

全ケースの収納実験結果は表-1に示したとおりである。膜面模型 No.3 以外は、逆折れ再現を目指したものであったが、実際に再現に成功したのは膜面模型 No.1 および No.7 の 2 例であった。膜面模型 No.3 は、膜面模型 No.1 の折り目中央に回転バネを増設し、その逆折れ抑制効果を検討したものである。

逆折れが生じた一例として、図-8 および図-9 に模型 No.7 の収納の様子を示した。なお、模型取り付けスペースの制約から、前節の図-7 の 4 つ折り模型の中央 2 面とは上下関係が逆となっている。図-8 は重力環境における収納であり、図-9 は無重力環境における収納挙動である。重力環境では正常に収納さ

れているが、無重力環境では逆折れが生じていることがわかる。ただし、いずれの場合においても、展開時には両端の回転バネの影響で中央の折り目の端部がはね上がり、その反力で膜面中央部が上方方向にたわむことで、軽微な逆折れが生じている。実験時に展開状況を観察したところ、展開幅が小さい間は順折れ状態にあるが、ある展開幅に達したときに突然軽微な逆折れが起こった。その変形の表れ方から考えて、鉛直力を受ける浅いアーチなどに見られる変形モードの飛び移り現象⁸⁾(飛び移り座屈: snap-through) の一種であると考えられる。

次いで、収納時を見ると、図-8 では重力の方向と順折れの方向が一致するため、展開時の軽微な逆折れが最終的には解消されている。ところが、無重力環境である図-9 においては、逆折れが成長して収納不良を生じている。写真を詳しく観察すると、膜面中央部のたわみが収納に伴って増幅する形で逆折れが進んでいるが、中央両端の回転バネ近傍部分は終始順折れ状態にあることがわかる。言い換えれば、端部の回転バネが順折れ方向のモーメントを加えているのに関わらず、中央部の軽微な逆折れたわみが保持され成長していることになる。したがって、膜面の中央部近傍は、圧縮状態にあるものと思われる。

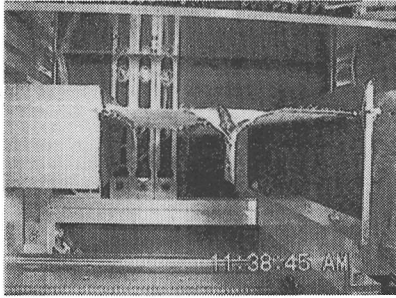
以上の観察から考えて、無重力実験の結果の解析においては、膜面を通常の膜理論⁹⁾のように圧縮力を保持しない張力部材として扱うよりも、微小ではあっても曲げ剛性を持つ薄板として扱うことによって、圧縮力の影響を取り入れることが重要であると推測される。そこで、次章の解析では、この影響を取り入れることが出来ると考えられる、膜面の曲げ剛性を考慮に入れた大変形解析を行うこととした。

3. エネルギー法による簡易解析

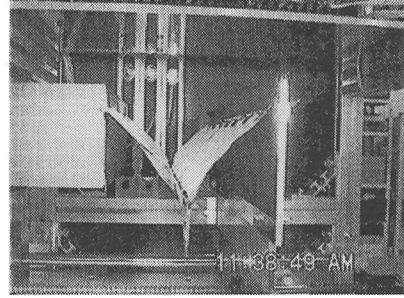
前章の実験における観察から、無重力環境における収納挙動に、膜面の曲げ剛性が大きく影響していることが予想される。そこで、ここでは、大変形時を対象に、膜面の引張りのみならず曲げ剛性をも考慮に入れた解析を行う。具体的には、ポテンシャルエネルギーの停留点を近似的に求めることによって、膜面の無重力実験における変形状について解析すると共に、逆折れ対策を検討する。

(1) 解析方法

図-10 に解析モデルを示す。膜面を板、折り目のヒンジの軸を梁としてモデル化し、それぞれ大変形を考えたポテンシャルエネルギーを考える。

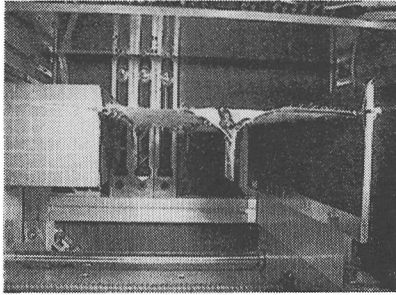


(a) 展開時

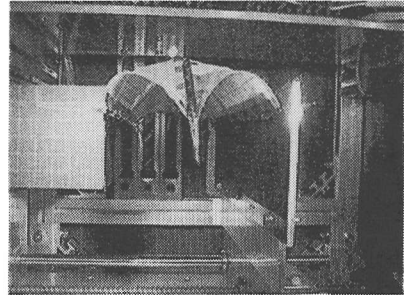


(b) 収納時

図-8 模型 No.7 の重力環境での収納時挙動



(a) 展開時



(b) 収納時

図-9 模型 No.7 の無重力環境での収納時挙動

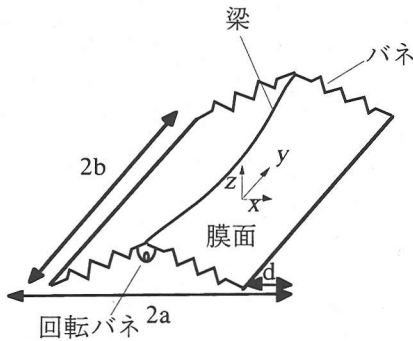


図-10 膜面模型解析モデル

中央両端の回転バネは、線形の回転バネとして、また膜面端部のカプトンテープ補強部は引張りバネとしてそれぞれモデル化している。簡単のため、座標系の原点は、図に示したように両端のヒンジ線を結ぶ平面に対する膜面構造の正射影の中心におくこととした。こうすることで、構造が x 軸および y 軸に対して対称となり、解析が大幅に簡素化される。

以下、エレメント毎にポテンシャルエネルギーを算定する。まず、膜面については、その厚さを h 、ヤ

ング係数を E 、ポアソン比を ν とし、図-10 のように各膜面の大きさを $a \times 2b$ とすれば、1枚あたりの大変形時のポテンシャルエネルギーは、

$$\begin{aligned}
 U_m &= \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_0^a \int_{-b}^b \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \\
 &\quad \left. + 2\nu \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1-\nu}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \right. \\
 &\quad \left. + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy \\
 &\quad + \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} \int_0^a \int_{-b}^b \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 \right. \\
 &\quad \left. - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy
 \end{aligned} \tag{1}$$

と表される¹⁰⁾。ただし、 (u, v, w) は、それぞれ x, y, z

方向の変位である。

中央折り目のヒンジ軸をモデル化した梁については、膜面と一体化して変形すると仮定すると、たわみ変位は $w(0,y)$ となる。したがって、大変形時のポテンシャルエネルギーのうち梁の寄与分は、

$$U_b = \frac{1}{2} E_b I_b \int_{-b}^b \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} dy \quad (2)$$

で与えられる。ここに $E_b I_b$ は、梁の曲げ剛性である。

端部回転バネについては、水平面と膜面がなす角が微小であり、その2次以上の項が無視できる場合には、

$$U_c = \frac{1}{2} C \left(\pi - \frac{2w(0,b)}{(a-d)} - \theta_0 \right)^2 \quad (3)$$

と表される。ここに、 C は回転バネの定数であり、 θ_0 はバネの初期変位角、すなわち畳まれているときの角度、 d は、図-10に示した収納距離である。なお、 θ_0 の座標は、完全収納が0度、完全展開が90度となるよう定めた。 d は展開時を0とし、収納が進展するにつれて増加するものとした。

端部のバネ定数 k のバネのポテンシャルエネルギーは、式(3)の場合と同様、水平面と膜面がなす角が微小であると仮定することで、

$$U_k = \frac{1}{2} k \left(-d + \frac{u(0,b)^2 + w(0,b)^2}{2(a-d)} \right)^2 \quad (4)$$

で与えられる¹¹⁾。

以上の関係に、各エレメントの個数を考えあわせると、膜面構造全体のポテンシャルエネルギーは、

$$U = 2U_m + U_b + 2U_c + 4U_k \quad (5)$$

となる。

次いで、膜面構造の変形を表す関数形について検討する。まず、収納開始付近の比較的変形が小さい領域でのビデオ画像（例えば図-9(a)）を参考にして、

$$w(x,y) = \left(1 - \frac{|x|}{a} \right) \left(Q_1 + Q_2 \cos \frac{\pi y}{2b} \right) \quad (6)$$

を膜面の z 方向の変形関数と仮定した。すなわち、 x 方向には中央に向かって直線的に増加し、 y 方向には \cos 形でたわむ変形である。すると、中央の梁の z 方向変位 w は、

$$w(0,y) = \left(Q_1 + Q_2 \cos \frac{\pi y}{2b} \right) \quad (7)$$

で与えられる。ここで、梁が不伸張であるとする、梁の y 方向変位 v は、

$$v(0,y) = - \int_0^y \left(\frac{dw}{dy} \Big|_{x=0} \right)^2 dy = - \frac{\pi^2}{16b^2} Q_2^2 \left(y - \frac{b}{\pi} \sin \frac{\pi y}{b} \right) \quad (8)$$

である。

膜面の y 方向の変形関数 v についても x 方向には線形に変化すると考え、式(8)と整合する形に変位を仮定すると、

$$v(x,y) = - \frac{\pi^2}{16b^2} Q_2^2 \left(1 - \frac{x}{a} \right) \left(y - \frac{b}{\pi} \sin \frac{\pi y}{b} \right) \quad (9)$$

となる。膜面の x 方向の変形関数 u については、中央部の $x=0$ で0であり、端部の $x=a$ で $-d$ であるから、やはり x 方向に線形に変化すると仮定すると、

$$u(x,y) = - \frac{d}{a} x \quad (10)$$

となる。

以上で導かれた変形関数を各部材のポテンシャルエネルギーの式に代入することによって、それぞれの変形状態に対応するポテンシャルエネルギーが計算可能である。さらに、ポテンシャルエネルギーの極小点を探索することで、発現する変形状態を求めることができる。

(2) 実験のパラメータを用いた解析

ここでは、逆折れの発生した膜面模型 No.7 の寸法ならびに材質の物性値を用いてエネルギーが極小になる点を探索することによって、逆折れ変形モードの発現の有無を検討する。膜面模型 No.7 の特性値は、材料物性値および実験時の計測より求めたが、膜面のポアソン比 ν ならびに回転バネ定数 C は、OHPシートやカプトテープの粘着部分がクリープ変形しやすく測定が困難であったため概略値を用いた。計算に用いた特性値は以下の通りである。

$$\begin{aligned} a &= 0.0600 \text{ [m]} & b &= 0.145 \text{ [m]} \\ h &= 7.50 \times 10^{-5} \text{ [m]} & E &= 1.00 \times 10^{10} \text{ [N/m}^2\text{]} \\ \nu &= 0.250 & C &= 1.00 \text{ [N/rad]} \\ k &= 7.00 \times 10^4 \text{ [N/m]} & \theta_0 &= 0 \text{ [rad]} \\ E_b I_b &= 4.00 \times 10^5 \text{ [Nm}^2\text{]} \end{aligned}$$

各展開・収納段階において、ポテンシャルエネルギーと膜面中央における z 方向変位 $w(0,0)$ との関係を示したのが図-11である。 d は端版の変位を表し、減少が展開、増加が収納を意味する。なお、 $w(0,0)$ が正であれば、膜面中央と回転バネの変形方向が同じである順折れを表し、負であると逆折れを表すことになる。図-11を見ると、収納されている状態（図中①）では、ポテンシャルエネルギーは順折れ・逆折れの2つの極小点を持つ。ここでは、順折れのエネルギーの方が低いことから、一般には順折れが生じることになる。ところが、展開を続けると徐々に逆折れ側のエネルギーが低下し（図中②③）、展開時 $d=0$ においては極小点は逆折れ側のみとなる（図中④）。この状況は、図-9に示した展開時の軽微な逆折れ変形に対応する。次に再び d を増加させて収

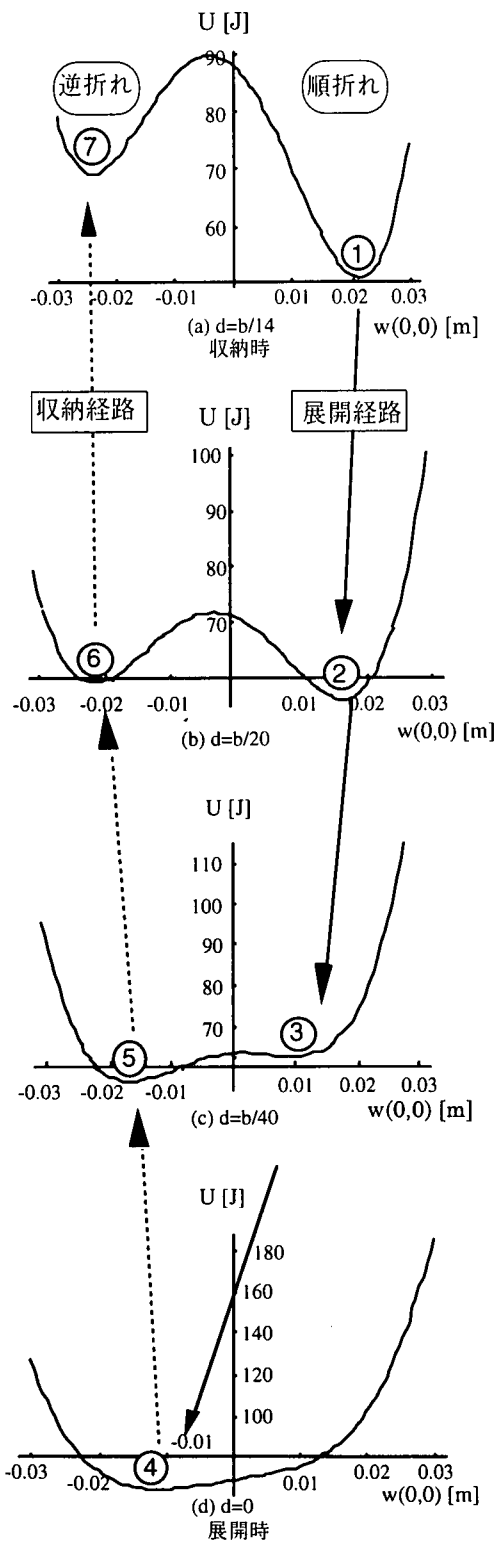


図-11 膜面模型 No. 7 のポテンシャルエネルギーと展開・収納経路

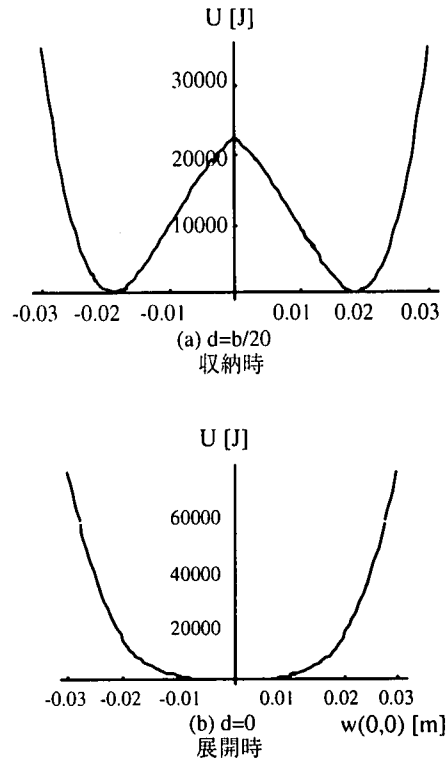


図-12 膜面模型 No. 7 の膜面剛性を 1000 倍にした場合

納する場合（図中⑤⑥）を見ると、一旦逆折れ状態にあるものが順折れに移行するには、逆折れ極小点近傍から抜け出すだけのエネルギーを得なければならないことがわかる。したがって、外乱がなければ展開時と異なる逆折れモードで収納されることになる（図中⑦）。このように、膜面模型 No. 7 では、展開と収納の際に異なる変形モードが生じ得ることが見て取れる。なお、この現象は、制御変数の増加と減少の際に異なる経路を取るという、典型的な飛び移り現象の特性を示している⁸⁾。

(3) 対策例

ここでは、上述のモデルを用いて、(i)膜面剛性を増加させる、(ii)膜面剛性を低下させる、(iii)回転バネ設置位置を増やす、という3つの構造的対策の適用可能性を検討する。

まず、第1の対策として、膜面の剛性 E を膜面模型 No. 7 の 1000 倍にした場合の結果を図-12 に示した。これは、定性的には、ダミーのパネルを貼って逆折れを防ぐ場合に相当する。やはり、順折れ・逆折れの2モードが存在する。図上ではいずれのモードのポテンシャルエネルギーも同程度のように見えるが、

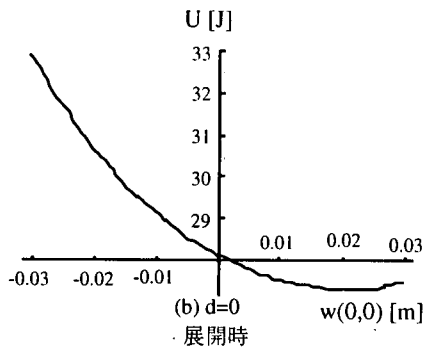
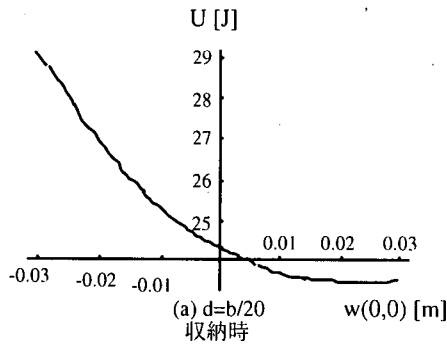


図-13 膜面模型 No.7 の膜面剛性を 1000 分の 1 にした
場合

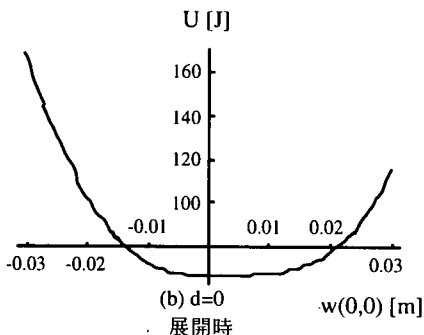
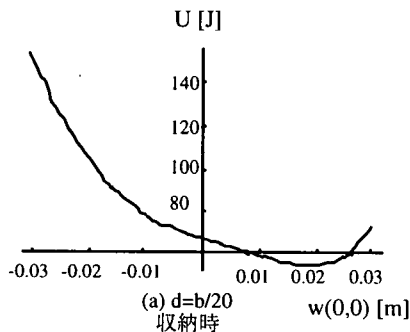


図-14 膜面模型 No.7 の回転バネ間隔 b を $1/3$ とした場合

詳細に検討すると順折れ側が 1 割程度低いエネルギーを示している。したがって、基本的には順折れが発生すると考えられる。膜面剛性が高い場合には、相対的にヒンジ軸の曲げ剛性が下がり膜面剛性の影響が出やすくなるので、逆折れ変形モード自体は消滅しない。反面、膜面自体は変形しにくくなることから、逆折れ側のポテンシャルエネルギーが高くなったものと解釈できる。展開時 $d=0$ においては極小点が一つであるが、 d の増加に伴って極小点が分岐する。したがって、 $d=0$ の近傍で多少の外乱が存在した場合には、変形経路が逆折れ側の極小点に移り、逆折れモードが発現する可能性も存在する。

次に、第 2 の対策として、膜面剛性を $1/1000$ にした場合のポテンシャルエネルギーを図-13 に示す。図に示したとおり、この場合は、逆折れから順折れ方向にエネルギーが単調減少であり、どのような場合にも逆折れが生じないことがわかる。これは、膜面の剛性が低ければ、相対的にヒンジ軸の曲げ剛性が高くなり、そのたわみが減少して逆折れが起こりにくくなるためであると考えられる。また、ヒンジ軸の曲げ剛性を高めた場合でも、相対的に膜面剛性を低下させることになるので、同様の逆折れ防止効果がある。したがって、収納されるアレイの設計を行う際に通常の膜理論を用いた場合には、膜面の曲げ剛性を無視することになるから、逆折れの可能性を見落とすことになる。

最後に、第 3 の対策として、回転バネをヒンジ軸の中間部分に設置することを考える。こうすることで、ヒンジ軸のたわみ変形が抑制され、逆折れを防ぐ効果が期待できる。表-1 に示した実験結果においても、逆折れが生じた膜面模型 No.1 のヒンジ軸中央に回転バネを追加した膜面模型 No.3 では逆折れが生じなかった。そこで、回転バネを増設して間隔を減らすことの近似として、 b を 3 分の 1 とし回転バネ間隔を小さくした場合について解析を行ったのが図-14 である。逆折れ領域における極小点が消失しており、順折れが生じた実験結果と整合する。

4. 結論

SFU 太陽電池アレイの収納不良をもたらした逆折れ現象を実験・解析両面から検討し、また、対策の方針を示した。主たる結論は以下の通りである。

1. 無重力環境における実験によって、重力環境では困難な柔軟な宇宙展開アレイの収納時挙動を模擬し、逆折れ現象を再現することに成功した。変形状の観察から、無重力環境では、通常の

解析では無視される膜面の曲げ剛性の働きの重要であると考えられる。

2. 逆折れの起こった膜面模型を対象に、実験時の変形形状を定性的に模擬する変位場を仮定してエネルギー法による解析を行った。その結果、逆折れは、展開時と収納時で経路が異なる一種の飛び移り現象 (snap-through) であることが示された。
3. エネルギー法を用いて、膜面剛性の向上および低減、追加回転バネ設置の3通りの対策について検討を行った。いずれの方法も有効であるが、膜面の剛性を向上させた場合には、逆折れモードに対応するポテンシャルエネルギー極小点は、高いエネルギーではあるが存在しており、外乱によっては逆折れに移行する可能性がある。他の2つの方法については、逆折れモードに対応する極小点自体が消滅している。

以上より、ダミーのパネルを貼って膜面の剛性を高めるという経験的な対策の他に、膜面の剛性を低下させる、あるいは回転バネを増設するという対策の有効性を示すことができた。特に、膜面の剛性を低下させるという方針は、重量の低減が期待できることから、将来性の高い対策であると考えられる。

本研究で扱った逆折れ現象では、収納時と展開時で変形の経路が異なることが示された。したがって、展開・収納構造物を設計する際には、展開時挙動の検討に加えて収納時挙動も検討しておく必要がある。

また、本実験では、通常の重力環境では影響が軽微である微小な摩擦のバランスや膜面の剛性等が大きく挙動を変化させることが観察された。通常の構造力学は、重力の存在を暗黙に仮定しており、また、構造技術者も重力の存在に慣れているので、重力のない空間での構造物の挙動を想像して設計するには困難が伴う。著者らも、当初、膜面の曲げ剛性の

影響を軽視していたため現象の本質をつかむことができず、多くの実験模型で逆折れの再現に失敗した。このように、無重力環境においては通常の構造力学の仮定が成り立たない場合があり、注意が必要である。今後、大型宇宙構造物を建造していくにあたっては、無重力環境での構造物、特に柔軟構造物の挙動について更なる研究の蓄積が必要となろう。

謝辞：本論文をとりまとめるにあたり、東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻藤野陽三教授には有益な助言を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 名取通弘：宇宙構造物工学の概要，土木学会論文集，No.410，pp.1-15，1989。
- 2) 三浦公亮：地上の構造・宇宙の構造，日本航空宇宙学会誌，Vol.38，pp.221-229，1990。
- 3) Bertin, J.J. and Johnson, S.W.: Access to space - systems and technology to support it, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol.10, pp.53-59, 1997.
- 4) 名取通弘，白木邦明：宇宙ステーションの安全性-宇宙構造物の安全性-，日本建築学会シンポジウム「空と海と陸の安全性-建築の安全性を考える」資料，1996。
- 5) 平成8年度文部省宇宙科学研究所概要，1996。
- 6) 宇宙開発事業団：NASDA ニュース，No.171，1996。
- 7) 地下無重力実験センター：Janic User's Guide，1995。
- 8) Bazant, Z. P. and Cedolin, L.: *Stability of Structures*, Oxford University Press, 1991.
- 9) Leonard, J. W.: *Tension Structures*, McGraw-Hill, New York, 1988.
- 10) 半谷裕彦：平板の基礎理論，彰国社，1995。
- 11) 塩竈裕三：宇宙展開膜面構造物の収納時における挙動解析，東京大学工学部土木工学科卒業論文，1996。

(1997.8.13 受付)

BEHAVIOR OF SPACE MEMBRANE AT RETRIEVAL PHASE

Masato ABE, M.C. NATORI, Ken HIGUCHI and Yuzo SHIOGAMA

Failure of solar panel array of SFU(Space Flyer Unit) during retrieval due to folding of some of the panel is investigated. Its retrieval behavior is studied experimentally in microgravity environment created by a dropshaft type facility, and then, analyzed by searching the minima of potential energy of the system. The flexural rigidity of the membrane, which is usually small and neglected, is found to strongly influence the deformation of the membrane in the microgravity environment. The failure is shown to be a kind of snap-through phenomena, where structural deformation during deployment and retrieval follows different paths. Based on these findings, several countermeasures to prevent this type of failure are also proposed.