

円筒膜の折りパターンを利用した開閉式膜構造システム

川口健一^{*1}
小澤雄樹^{*2}

梗概

膜材は柔軟な材料であり、膜構造の建築時にはその柔軟性を利用して施工される場合が多い。しかし、完成した膜構造においては、張力導入などにより安定化した形で用いられることが一般的であるため、この柔軟性が完成後も利用されることは少ない。本論文では、円筒形状の膜面を平面状に畳みこむパターンを提案する。円筒形状を開状態、平面形状を閉状態と考えることにより、開閉動作を伴う種々の建築構成要素として利用が可能である。まず、畳み込みパターンの幾何学的関係について説明し、続いて開閉式膜構造への応用について述べる。

1. はじめに

柔軟性は膜材料の重要な特質である。軽量で柔軟な膜材は取り扱いやすく、簡単に所定の場所に配置、固定することができる。ロール状に巻かれ、或いは、畳まれて輸送されるなど、膜構造の建設現場では膜材の柔軟性が活かされて施工されている。しかし、ひとたび建設を終えてしまうと、その柔軟性が再び利用されることは少ない。

狭いスペースシャトルの空間を利用して運ばれる宇宙構造物では、構造物が畳めるという事が重要であり、膜などの面状の構造物の畳み込みパターンについてもいくつか研究がなされている(Miura, 1987; Guest, 1994)。地上の建造物としては、Stuttgart 大学の軽量構造研究所(IL)が 70 年代に膜材料の畳み込みについて調査を行ない、様々な畳み込みパターンのスケッチを公表している(Otto, 1972 & 1975)。

実構造物としては、モントリオールオリンピックスタジアムに建設された膜屋根が膜の柔軟性を利用して開閉式膜屋根に挑戦した

好例として知られている。最近では、より洗練された制御技術を用いて J.Schlaich 等のチームによって、スペイン・サラゴサの開牛場が開閉式膜屋根が建設されている。これらの開閉膜システムへのアプローチの問題点の一つは、畳まれた膜が屋根空間の中央部に塊となって残るという点であり、開状態においてもこの膜塊を支えるケーブル等が張り巡らされた状態で常に屋根空間に残る。

本論文では、新しい開閉式膜構造システムの原理を提案する。基本原理は円筒型膜を振ることによって生じる畳み込みパターンの応用であり、円筒膜の内側の開口部が上下のリングの単純な相対回転によって簡単に開閉できるというシステムである。単純な原理であるが、100 パーセントの開口率が実現され、さらに、張り巡らされたケーブルや膜材によって放射方向に発生する張力が、常に二つのリングの中で相殺されるという力学的に有利な特質も兼ね備えている。

以下に、このシステムの簡単な幾何学的関係と開閉式膜屋根構造、開閉式空気膜構造への応用等について述べる。

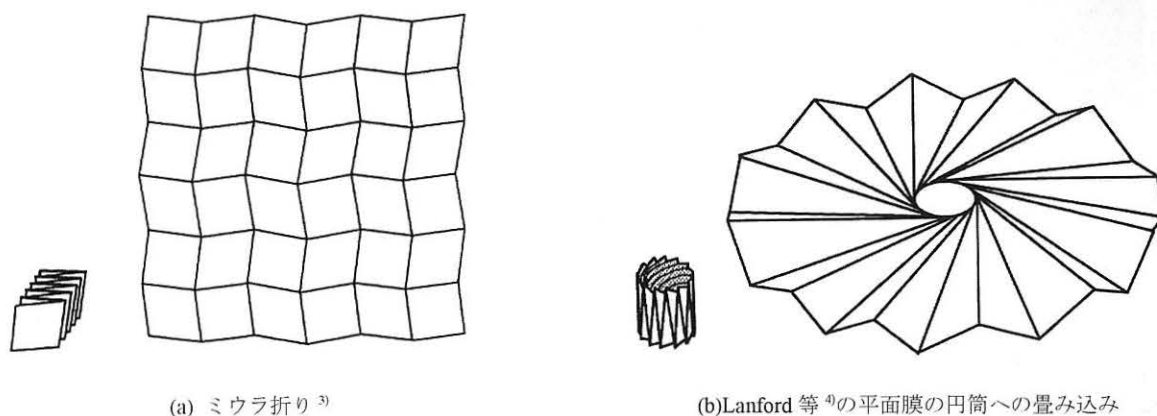


図1：既往の膜の畳み込みパターン

*1 東京大学生産技術研究所 助教授

*2 東京大学大学院工学系研究科 修士課程

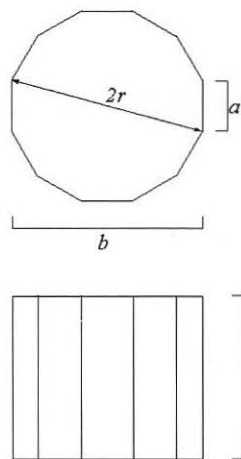


図2：初期状態の正 n 角柱の形状

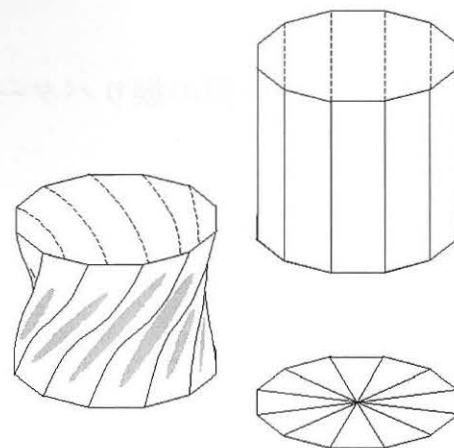


図3：振れパターンを利用した畳み込み

2. 円筒型膜の振れを利用した畳み込みパターン

本論文で提案する開閉式システムは、筒形膜の両端のリングを振ることにより得られる畳み込みパターンを利用している。本節では、この畳み込みパターンの幾何学的な関係について説明する。

簡単のために、筒形膜を高さ h の正 n 角柱として考える(図2)。この角柱の状態を開状態とする。開状態では、膜面は角柱の側面を形成している。次に、角柱の底面と上面にある正 n 角形を互いに逆方向に回転させると振れパターンが生じ、元の角柱は正 n 角形の平板状に次第に畳み込まれていく。畳み込みの途中の状態では、上下の境界部分の正 n 角形は徐々に接近し、最終状態ではひとつの平面内に重なり合う。この状態が閉状態である。最終状態では n 角形内部は、初期状態において側面を形成していた膜面によって閉じられる。(図3)

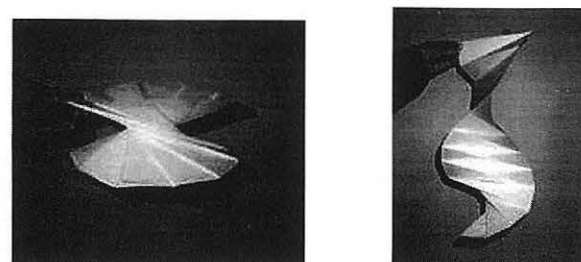
ここで、閉状態において、初期の膜面が平面状態を形成し、境界リングが丁度重なり合って畳みこまれるためには、幾何学的な適合性より、開状態の正 n 角柱形状は、以下の簡単な関係を満たさなくてはならない。

$$h = b = 2r \cos \pi / n \quad (1)$$

ここに h は初期の正 n 角柱の高さであり、 r は上下面の正 n 角形の外接円の半径、 b は同じ正 n 角形の内接円の直径である(図2)。この時、上下面の境界リングが相対的に $(n-1)/n \pi$ だけ回転すると、初期の開口部が丁度閉じられるのである。

式(1)は、初期の角柱と最終的に平面上に畳み込まれる膜面との間の幾何学的な適合条件を表しているだけである。畳み込み過程の途中の形状は必ずしも適合した状態にはなっていない。初期の角柱の側面を形成している膜面は、畳み込みの間、主に剪断変形を強いられる。したがって、本畳み込みパターンは織布や膜材のように剪断剛性が低い材料に適しているといえる。畳み込み時の変形状態に関しては、本稿の4. 数値解析の中で再び触れる。

本畳み込みに出てくる開状態の円筒形面や正多角柱、及び閉状態の平板は微分幾何学における可展面であることは良く知られている。しかし、閉状態の平板状のパターンをさらによく観察すると、その形状は、線織面として知られる一葉双曲面を平らにつづした形となっていることが分かる。この一葉双曲面の一辺に沿ってこの回転面を切り開くと、常螺旋が得られる(図4)。微分幾何学で知られているように、一葉双曲面は、常螺旋と等長対応の関係にある。これらの曲面は多くの折り目によって形成されているので、連続でなめらかな曲面に適応される微分幾何学をそのまま当てはめることはできない。しかしながら、閉状態の一葉双曲面は、広い意味で、常螺旋と等長対応の関係にあるということが出来る。



(a) 閉状態の一葉双曲面

(b) 閉状態を切断して得られる常螺旋面

図4：一葉双曲面と常螺旋面

3. 開閉式膜屋根への応用

前節で述べた畳み込みパターンを、新しい開閉式膜屋根システムに応用することを考える。初期開状態での角柱の側面と最終閉状態での平板は、共に可展面である。したがって、これらの膜面を実現するためには、複雑な立体裁断を考える必要は無い。但し、膜面は、畳み込み、及び展開の途中では主に剪断変形を受ける。本節では、この畳み込みパターンを開閉式膜屋根システムに応用する場合の例について述べる。図5、6に応用例の概要を示す。円筒型の膜の両端には構造材としてのコンプレッションリングが接続されている。円筒膜を上下に完全に広げて用いる場合には、2つのリングは上下に離れて配置されるが、円筒膜を途中で折り返すことで、始めから隣接する様に配置する事もできる(図5(a)及び(a'))。これら2つのコンプレッションリングを相対的に回転させるだけで、膜屋根の開閉を自動的に行うことができる。

屋根面を閉じた状態で膜面が構造要素として働くためには、何らかの形で膜面に張力を導入することが必要となる。ひとつの方法は空気圧の導入である。空気による内圧を導入した場合は、開閉式空気膜構造となる。図5のような場合、最終閉状態では膜面は図4(a)に示すような連続した2重膜面を形成しているので、この2重膜の間に空気を充填し、内圧により緊張した膜面を得ることができる。屋根構造はいわゆる空気充填型(Air-inflated type)の空気膜構造となる。

円筒膜の上か下の半分をケーブルの列におきかえると、閉状態の膜面は、放射方向にケーブル補強された1重膜構造となる(図6)。膜面の下の内部空間を気密にし、ここへ送風して内圧を得れば、空気支持型(Air-supported type)の開閉式空気膜構造となる。

それぞれの場合に対応させて作成した模型の写真を図7～9に示す。

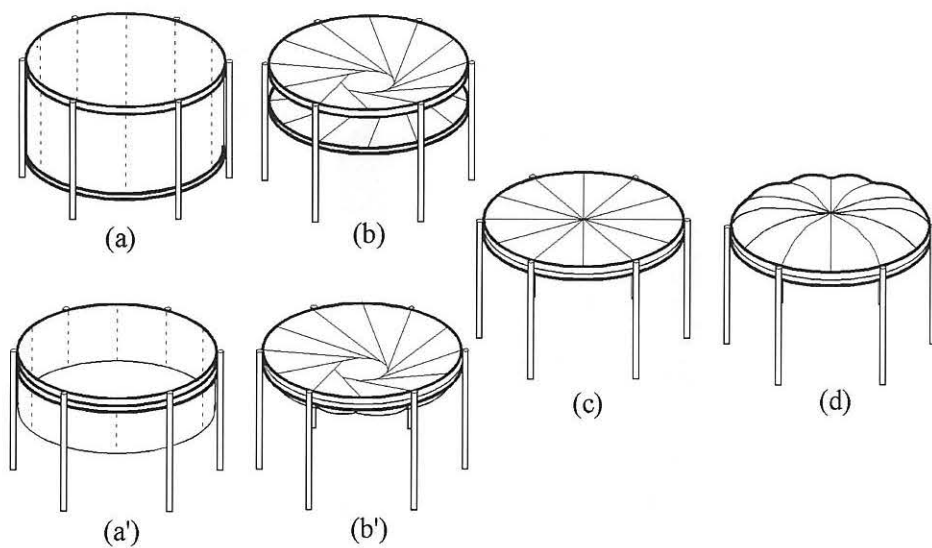


図5：開閉式空気膜構造への応用1

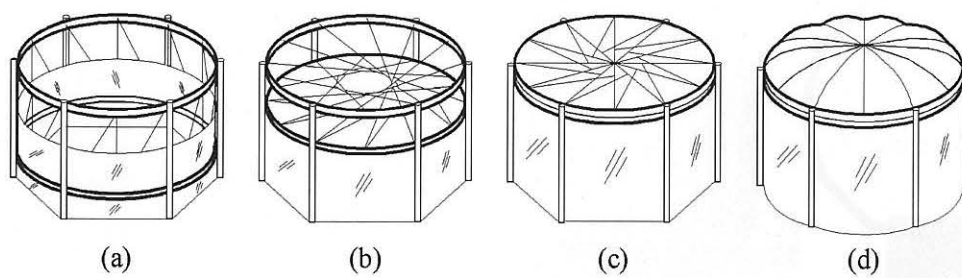


図6：開閉式空気膜構造への応用2

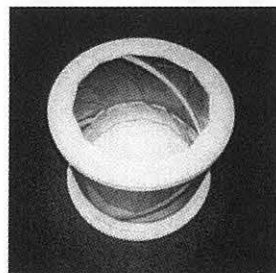


(a) 開状態

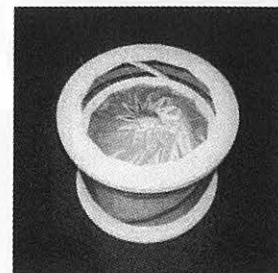


(b) 閉状態

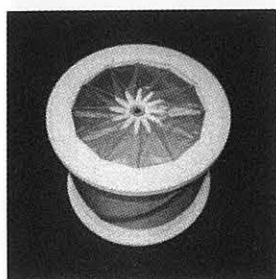
図7：開閉式膜構造モデル



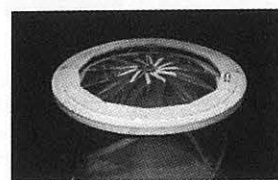
(a) 開状態



(b) 開閉途中



(c) 閉状態



(d) 内圧導入後の膜面

図9：空気支持型空気膜モデル



(a) 空気充填前



(b) 空気充填後の膜面

図8：空気充填型空気膜モデル

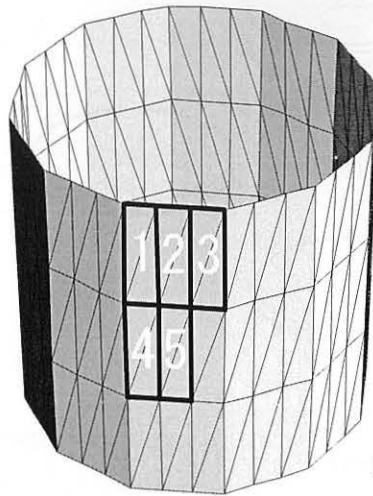


図10：解析モデルと要素番号

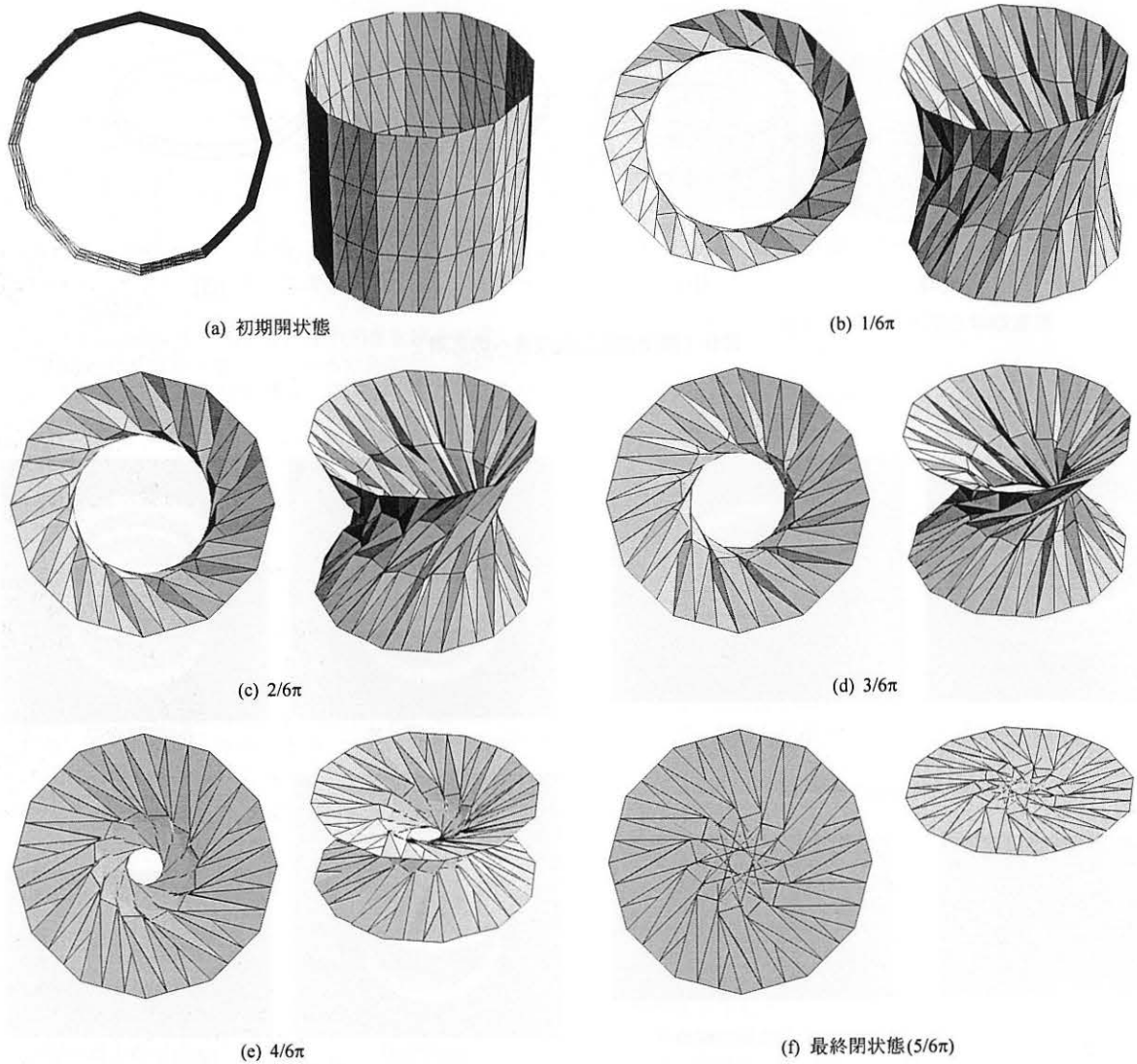
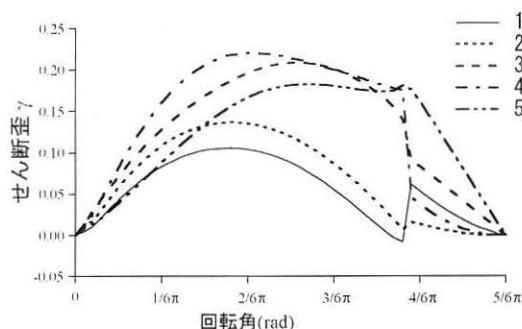


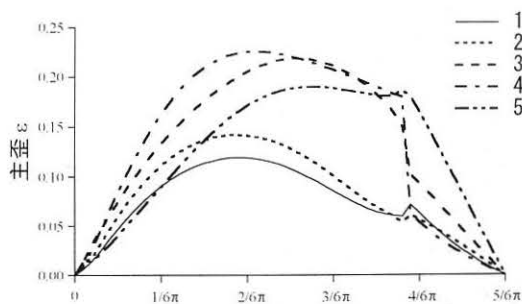
図11：数値解析により得られた変形過程

4. 数値解析

2 節で述べた様に、開閉途中の畳み込み過程では、膜面は上下のリングの回転に伴い変形を受ける。この時の膜面の状態を定性的に把握するため、幾何学的非線形性を考慮した数値解析を実施した。数値解析モデルを図 10 に示す。膜モデルは、直径 100m の円に内接する正 12 角柱(高さ:96.5925m)とし、回転に伴い上下のリングが近づく様に変位制御による解析を行なった。初期の角柱の上下リングの同一稜線上にある点の距離を一定に保つ拘束条件を入れている。膜厚は 0.61mm、膜材は 1m 幅辺りの伸び剛性:238140N/m、ポアソン比:0.50 の等方性膜材と仮定した。解析結果を図 11~図 13 に示す。図 12 は振り変形過程に伴う歪の変化の様子を示している。但し、各々の歪値は、図 10 に示す 2 つの対になった 3 角形膜要素の平均値を用いている。図 12 (a) は周方向と母線方向に座標軸を取った場合の面内剪断歪を示している。歪は要素 4 において最大であり、剪断歪は最大で約 0.22 である。図 12 (b) に示す主歪も要素 4 において最大であり、最大値は同じく 0.22 である。主歪と剪断歪の変化の様子はおよそ一致しており、膜面が変形の過程で主に剪断歪を受けていることが分かる。図 13 に示す様に膜要素全体に蓄積されている総歪エネルギーは最大で 5.3×10^7 (N·cm) である。初期状態及び、最終状態では歪が零になっていることが分かる。従って、膜面は図に示されるように、開閉の途中で歪エネルギーの山を越えなくてはならない。但し、実際の膜は圧縮応力にほとんど抵抗せず、面外にしわなどを生じることで、変形を吸収してしまう。また、バイアス方向には剪断剛性も低い。従って、実際の膜面は、本解析で求めたよりもずっと歪エネルギーの低い状態を通過して最終状態に到達すると思われるが、定性的には、本解析のような変形の山を越えなくてはならないと考えられる。解析では、約 $4/6\pi$ rad 付近で、要素の変形状態が大きく変化している。これは、変形過程が徐々にエネルギー状態の高い方へシフトし、ある時点で膜要素に溜まった歪が解放されるために発生しているようである。この現象は要素分割や初期条件などに依存して発生する。本解析では、膜が圧縮に抵抗しないことや、しわが発生することなどを考慮していないために生じるものと考えられる。 $4/6\pi$ rad 以降の歪エネルギーの低い状態がより実現象に近いと考えられるが、この時は、図 12 に見るように、1 2 角形側面の対角位置の要素 5 及び要素 3 に剪断を主とする歪が大きく生じていることが分かる。



(a) 周方向面内剪断歪の変化



(b) 主歪の変化

図 12 : 歪の変化

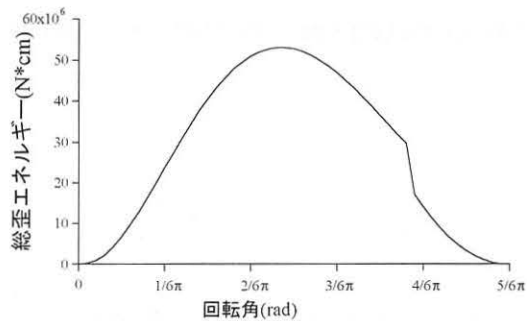


図 13 : 総歪エネルギーの変化

5. おわりに

本論文では、円筒膜の振りパターンを利用した開閉式膜構造システムを提案した。本システムは原理が極めて簡単であり、円筒膜境界部のリングを回転するだけで自動的に膜面の開閉パターンを生成することができる。空気圧などを用いて膜面に張力を導入することが可能で、導入される張力は、2つの境界部のリングで効果的に相殺される。

初期の開状態及び最終的な閉状態において、膜面は幾何学的に適合しているが、途中の移行過程は、適合した形状ではない。従って、開閉の途中においては、膜面は強制的な変形を受ける。また、閉状態において折り目を生じるため、この部分の膜材は、開閉に伴い、繰り返し屈曲を受ける。この屈曲部に関しては繰り返し折り曲げに強い材料或いは特別なディテールを考える必要がある。開閉過程において膜面に生じる変形や折り曲げについて調査するため、目下、実験を計画中である(図 14)。

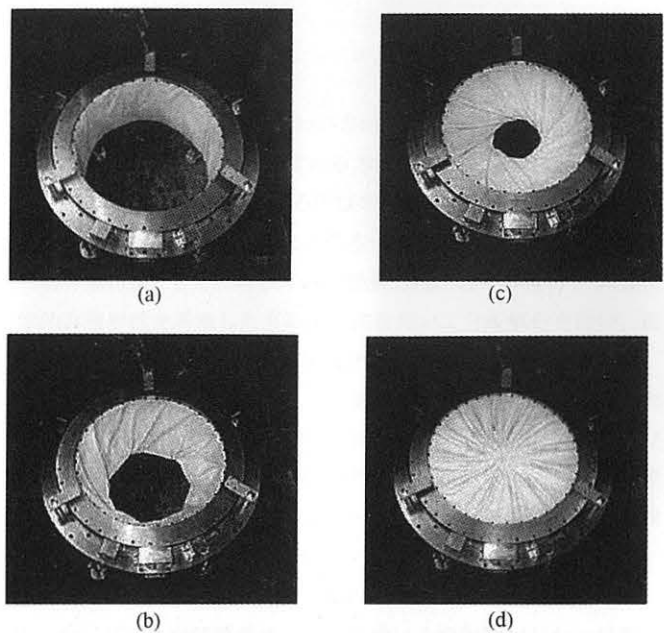


図 14 : 実験用モデルの概観

参考文献

- 1) Otto, F. (1972) dir., *Convertible Roofs (IL5)*, Information of the Institute for Lightweight Structures (IL), University of Stuttgart.
- 2) Otto, F. (1975) dir., *Convertible Pneus (IL12)*, Information of the Institute for Lightweight Structures (IL), University of Stuttgart.
- 3) Miura, K. (1987) Conception of Deployable Space Structures, *J. the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.90, No.828, 1394-1400, in Japanese.
- 4) Guest, S.D. (1994) *Deployable Structures: Concepts and Analysis*, Dissertation submitted to the University of Cambridge for Ph.D.
- 5) Yoshimura, Y. (1955) On the Mechanism of Buckling of a Circular Cylindrical Shell under Axial Compression, *NACA TM-1390*.

Ken'ichi Kawaguchi ^{*1}
Yuuki Ozawa ^{*2}

SYNOPSIS

Membrane is a very useful material and its flexibility is one of its remarkable features, which we do not see in other structural materials. This flexibility is exploited during the construction of membrane structures: the membrane is usually transported to the site folded or rolled and unfolded or unrolled there. Since it is flexible, it is easy to handle and put in position. However, once the construction of the structure is completed and the membrane is fixed in its designed position, its flexibility is rarely utilized again. In the paper a new approach for retractable membrane structure system using flexibility of membrane is proposed. The fundamental system is based on the folding pattern of a cylinder into a flat disk through a twisting motion. The opening of a cylinder can be easily closed by a simple relative rotation of its boundary rings. A simple relationship in the geometry of the folding pattern is shown, some applications to retractable membrane roofs, especially to retractable pneumatic roofs are described and a result of numerical analysis is also discussed.

*1 Associate Professor, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

*2 Graduate Student, Department of Engineering, University of Tokyo