

膜の捩じれパターンを利用した開閉式屋根構造に関する研究

Research on Retractable Roof Systems with Twisted Membrane

小 澤 雄 樹*・川 口 健 一*

Yuuki OZAWA and Ken'ichi KAWAGUCHI

1. はじめに

1990年代に入って、さまざまな形式の可動機構を持つ大空間建築が実現されている。「動く建築」は、21世紀の建築の発展を促す一つの潮流となると考えられる。

「動く建築」の代表として、開閉式屋根構造がある。福岡ドームなどいくつかのものが実現されているが、これらの機械式の開閉式屋根構造は、構造体が複雑になり屋根荷重も非常に大きなものとなっている。そのため開閉動作を行うためには多くのモーターが必要となり、それらを制御するシステムの構築が重要となってくる。また施工の際は高精度の施工技術が要求され、完成後のシステムの維持管理も容易ではない。

一方で、膜は非常に有用な素材であり、テントなどの仮設構造物から東京ドームに代表されるような大スパンの恒久建築物に至るまで広く利用されている。膜材料の最大の利点は、非常に軽量であることである。荷重が小さいと言うことは、それだけ動かしやすいということである。膜材料を可動建築として利用する意義は非常に大きい。

軽量であること以外で、膜だけが持ちその他の構造部材には見られない重要な特性の一つは、その柔軟性である。膜の柔軟性がもっとも利用されるのは、その施工時においてである。膜は折り畳まれるか巻かれるかして小さく収納されて建設現場へと運搬され、そこで展開される。柔軟かつ軽量なので扱いやすく、設計図で定められた位置に設置するのも容易である。しかしいったん建築が完成してしまうと、膜面に張力を導入して安定した状態で使用されることが多いため、建設完了後その柔軟性が再び利用されることは非常にまれである。

宇宙工学の分野においては、膜の畳み込みパターンがいくつか提案されている (Miura, 1987; Guest, 1994)。地球上の構造物においては、70年代にシュツットガルト大学のIL研究

グループが膜の畳み込みパターンに関する調査を行っている (Otto, 1972 & 1975)。膜材料を用いて大規模な開閉式屋根構造に挑戦した例として、モンリオールのオリンピックスタジアムの天蓋がある。最近ではそれとほぼ同じ考え方に基づき、技術的にはもっと洗練された例として、J. Schlaichのチームによるサラゴサアリーナがある。これらの開閉式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る。

本論分では膜を用いた開閉式屋根構造の新しい手法について報告する。その基本的な機構は捩じり回転を利用して円筒形状の膜を平面に折り畳む、畳み込みパターンにある。このシステムの最大の長所の一つは、システムが単純であることである。円筒の開口部は両端のコンプレッションリングの相対的な回転運動によって容易に閉じることができる。円筒形状状態を開状態、平面形状状態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。

2. システムの概要

2.1 捩じりを利用した円筒形膜の畳み込みパターン

捩じりを利用して円筒形膜を平面に畳み込むパターンは、ある幾何学的条件にのっとって行われる。ここでは膜形状の単純な幾何学的条件について述べる。

高さ h の正 n 角柱はその上底面と下底面の相対的な捻じり回転によって、平面状の正 n 角形に畳み込まれる (図1)。初期形状においては、折り目のついた一続きの膜面は多角柱の側面を形成している。その膜面は、多角柱の内部が抜けた広い開口部の周りを取り巻いている。円筒形状から平面形状への移行過程では多角柱の上下両底面の正 n 角形は互いに反対の方向に回転するので、多角柱は捩じれを生じる。上下面の正 n 角形は回転するにしたがって互いに近づき、最後には平面に畳み込まれて同一平面上に一致する。最終段階では円筒形状の側面は平らに折り畳まれ、開口部は畳み込まれた膜面によって閉じられる。

*東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

2.2 幾何学的条件

円筒形膜の幾何学的適合性より，最初の多角柱の高さ h と底面の正 n 角形の外接円の半径 r との間には次の単純な関係が成り立つ。

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

上下底面の多角形の相対的な回転角が $(n-2)\pi/n$ に達したとき，多角柱の開口部はちょうど閉じられる。上式は，初期の角柱と最終的に平面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，主にせん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せん断剛性が低い材料に適し

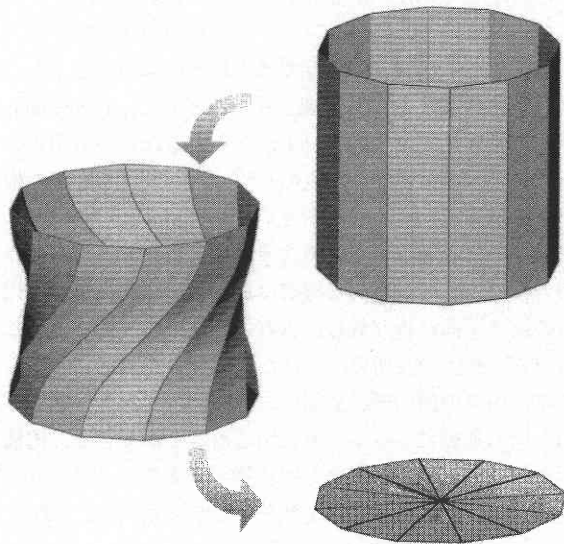


図1 円筒形膜の畳み込みパターン

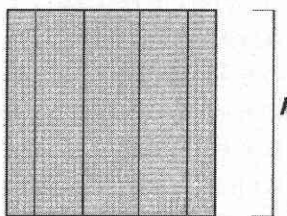
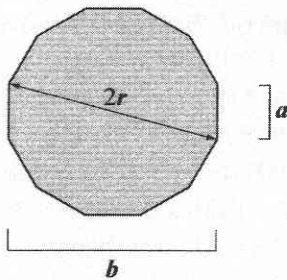


図2 幾何学的条件

ていると言える。畳み込み時の変形状態に関しては，数値解析の章で再び述べる。

2.3 開閉式膜構造への応用

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として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，これらの膜面を形成するために，複雑な立体裁断を考える必要はない。但し，膜面は，畳み込み，及び展開の途中では主にせん断変形を受ける。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3, 4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。円筒形膜を上下に完全に広げている場合には，2つのリングは上下に離れて配置されるが，円筒形膜を途中で折り返すことで，始めから隣接するように配置することもできる。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機能するためには，何らかの形で膜面に張力を導入することが必要となる。一つの方法は空気圧を用いることである。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。このような場合，最終閉状態では膜面は図3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。

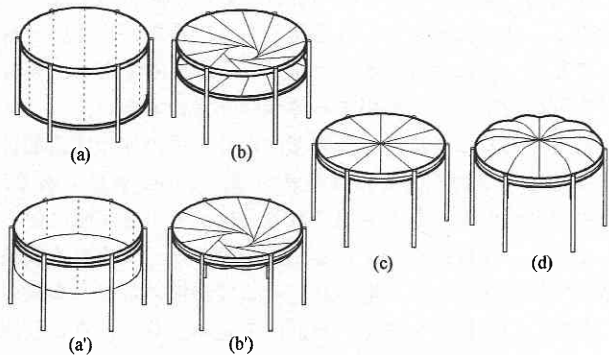


図3 開閉式空気膜構造への応用例 1

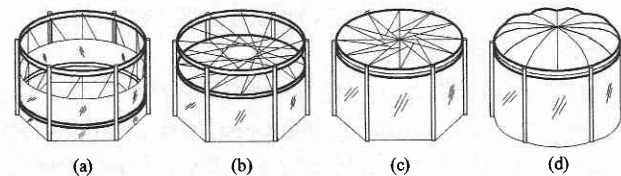


図4 開閉式空気膜構造への応用例 2

円筒膜の上側か下側の半分をケーブルの列に置き換えると、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4)。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。

1重膜構造の模型写真を図5に示す。

3. 角形要素を用いた数値解析

3.1 解析の目的

本システムが成り立つためには、膜材料の持つ特異な性質が必要不可欠である。逆に言えば、膜材料の特性を定性的に把握することが本研究を進める上で重要なポイントとなってくる。

本研究に特に関連が深いと思われる点は幾何学的不一致により生じるしわである。初期状態において、同一平面上にあった膜のパネルの境界が、リングの回転により捩じれる位置となり、初期の平面膜パネルとの間に幾何学的不一致を生じる。これにより、膜パネルはせん断変形としわを生じることとなる。

したがって、本システムでは膜材は畳み込み過程において大きなせん断変形にさらされる。よって、膜のせん断変形に対する抵抗特性の把握が重要である。

膜材に発生するしわに関しては、分岐座屈理論、張力場理

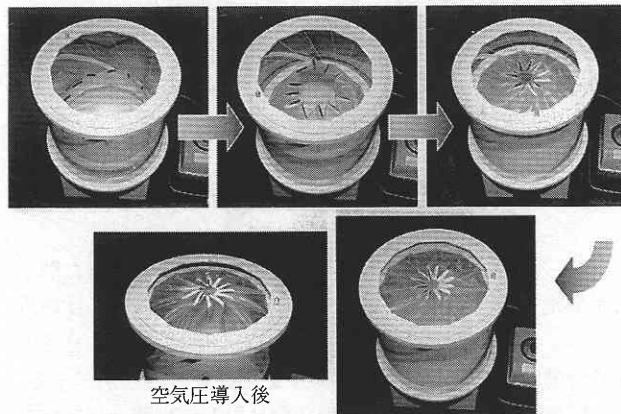


図5

表1 膜材の材料定数

厚さ h (mm)	0.61
ヤング率 E (tf / m)	2.43
ポアソン比 ν	0.5

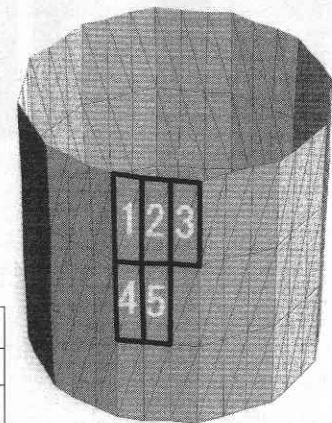


図6 解析モデルと要素対番号

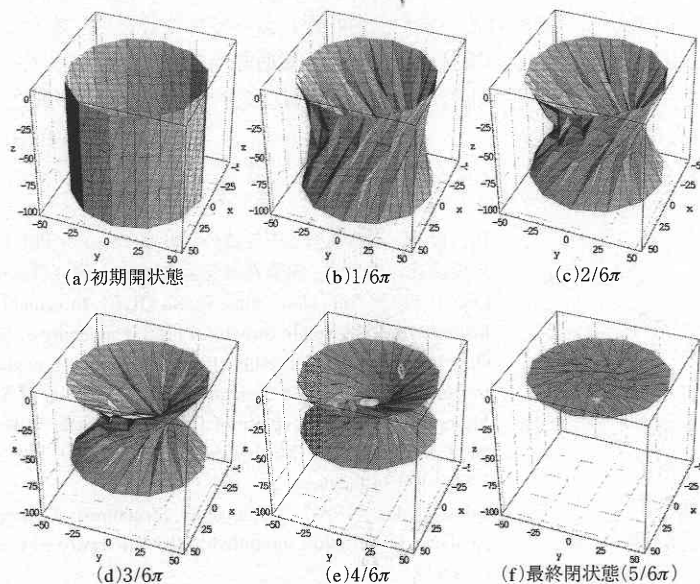


図7 変形の様子

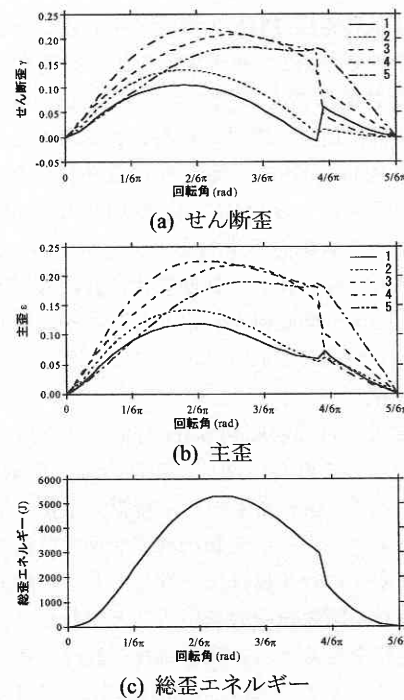


図8 解析結果

研究速報

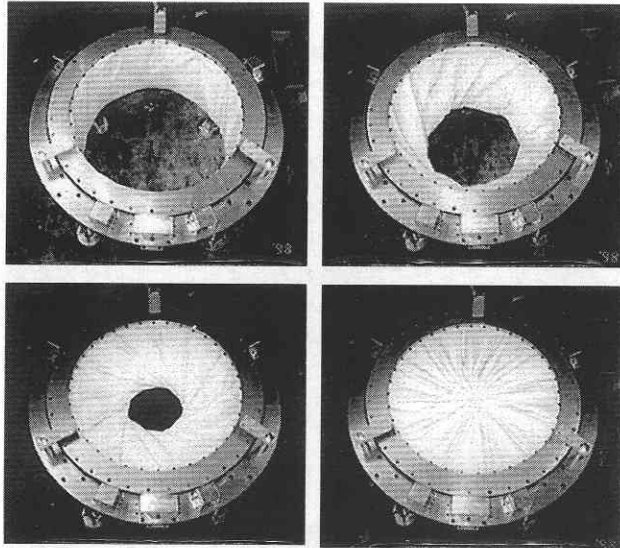


図9 実験的研究

論などの方面から研究が進められているが、幾何学的な不一致により生じるしわに関する研究はほとんどなされていないので、本研究では3角形膜要素の解析で定性的な挙動を把握する事とする。また、3角形要素を用いる場合、要素分割を細かくする程に面外変形を起しやすくなるので、膜の非圧縮性に関しては、解析モデルの要素分割を細かくすることによって近似的にモデル化できるものと考え。

3.2 解析条件

本章では変形過程において膜面に生じる歪などの定性的性質を把握するため、3角形要素を用い幾何学的非線形性を考慮した数値解析を実施した。解析モデルを図6に示す。また解析に用いた膜材の材料定数を表1に示す。膜モデルは直径100 mの円に内接する正12角柱(高さ96.59 m)とし、上側リング上の節点に中心軸周りの強制回転を与えることによって畳み込みを行った。下側リング上節点は、上側リングの回転に伴い、初期形状における上下リングの同一稜線上の節点間距離が一定となるような鉛直方向強制変位を与えて制御している。

3.3 解析結果

計算の結果、目標回転角 $5/6\pi$ (rad) まで到達し、平面形状まで畳み込まれた。図7に変形の様子を示す。また、図6に示す2つ一組の要素のせん断歪、主歪の平均値、全要素の総歪エネルギーの変化の様子を図8に示す。主歪とせん断歪の変化の様子はほぼ一致しており、膜面は変形の過程で主にせん断歪を受けていることがわかる。総歪エネルギーの変化を見ると、初期形状及び最終形状では歪が零になっている。したがって、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ければならない。

変形の様子を見ると、 $1/6\pi$ (rad) では側面の対角線方向で外向きの折りが形成されていることがわかる。この折り目のつき方は目標の畳み込み形状に対して逆向きである。図8の(a)~(c)のグラフでは約 $4/6\pi$ (rad) 付近で、要素の変形状態が大きく変化しており、ある程度歪エネルギーが蓄積されたところで、エネルギーの高い変形状態から、低い状態へと一気に移行し歪が開放される、座屈に似た現象が生じていると考えられる。言わば変形経路を自ら修正する作用が働いていると言える。変形状態が変化した後には、対角線方向に位置する要素3, 5にせん断を主とする歪が最も大きくなっていることがわかる。

4. 実験

解析と同時に中規模モデル(リング直径約1 m)を作成し、開閉試験を行った。図9に膜の開閉動作の写真を示す。現在のところ膜の歪を測定できる柔軟な歪ゲージ等が開発されていないため、開閉過程に膜に生じるしわを測定することはできていない。膜材の柔軟性に追従できる柔軟なセンサーの開発が必要である。

5. 結論

本報では、円筒形膜の畳み込みパターンを利用した開閉式屋根構造システムについて報告した。本システムは原理が極めて単純であり、円筒膜両端のリングを回転させるだけで自動的に膜面の開閉パターンを形成することができる。

初期の開状態及び最終的な閉状態に対しては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性が成り立っていない。したがって、開閉過程において膜面は強制的な変形を受ける。また、閉状態において折りを生じるため、この部分の膜材は、繰り返し屈曲を受ける。したがって、本システム実現のためには、適切なディテールの設計が重要である。

(2000年2月10日受理)

参考文献

- 1) 川口健一, 小澤雄樹: 円筒膜の振りパターンを利用した開閉式屋根構造システム, 膜構造研究論文集'99, 現在投稿中。
- 2) Otto, F. (1972) dir., Convertible Roofs (IL 5), Information of the Institute for Lightweight Structures (IL), University of Stuttgart.
- 3) Otto, F. (1975) dir., Convertible Pneus (IL 12), Information of the Institute for Lightweight Structures (IL), University of Stuttgart.
- 4) Miura, K (1987) Conception of Deployable Space Structures, J. the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 90, No. 828, 1394-1400, in Japanese.
- 5) Guest, S.D. (1994) Deployable Structures: Concepts and Analysis, Dissertation submitted to the University of Cambridge for Ph.D.
- 6) Yoshimura, Y. (1955) On the Mechanism of Buckling of a Circular Cy.