

筒状膜構造の折り畳み解析に関する研究

佐賀大学 学生会員 三藤政信, 木戸弘大

正会員 井嶋克志, 帯屋洋之, 川崎徳明

1. まえがき

宇宙工学分野では風船構造からなる人工衛星や光圧を推進力とするソーラーセイルなどをロケットに効率よく収納し宇宙空間で確実に展開するため、折り畳み収納法の開発が行なわれている。また工業製品においても折り畳み可能な製品は輸送コストの削減などをもたらす環境負荷の軽減にも寄与する。

一方、これら折り畳み・展開構造の研究にはシミュレーション解析が必要となるものの紙モデルによる実験的研究や剛版構造による数値解析が主体である。本来、柔な材料により構成される折り畳み・展開構造は、膜構造としてのシミュレーション解析が合理的と考えられるが、膜モデルを用いた解析例はない。

本研究は、大規模膜構造物仮設時などの大変形現象を解析するため開発した線材ユニットによる非抗圧膜モデルを用いて折り畳み・展開構造のシミュレーションを行なうものである。

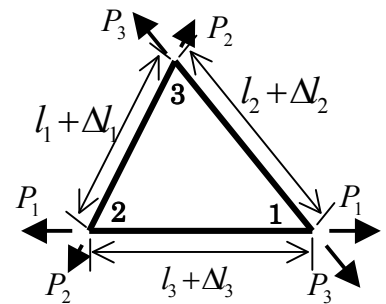


図-1 定ひずみ三角形要素

2. 定ひずみ三角形要素の線材ユニット置換

定ひずみ三角形要素を図-1のように表し、辺方向に要素端力を定義すれば次の剛性方程式を得ることができる。

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = \frac{D}{4A} \begin{bmatrix} e_1^2 + \mu l_1^2 & e_1 e_2 - \mu l_1 l_2 & e_3 e_1 - \mu l_3 l_1 \\ e_2^2 + \mu l_2^2 & e_2 e_3 - \mu l_2 l_3 & \\ sym. & e_3^2 + \mu l_3^2 & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{Bmatrix}, \quad D = \frac{Et}{1-\nu^2}, \quad \mu = \frac{1-\nu}{2} \quad (1a,b,c)$$

ここに、膜材は等方性と仮定し、 t ：膜厚、 A ：無応力時要素面積、 E ：ヤング率、 ν ：ポアソン比、 l_n, e_n ：無応力要素における辺 n の長さおよび頂点 n と垂心間の距離である。

一方、6本の軸力部材により1次不静定トラス構造を構成する。定ひずみ要素と同一形状を形成する辺部材を主材、3頂点から射出し1点で結合する3部材を副材、この結合点を補助点とする。この主材と副材の伸び剛度と主材と補助点からの距離を適切に定めたユニット構造は式(1a)と等しい剛性方程式となる。得られたユニット構造を構成する軸力材を柔ケーブルに置換すれば非抗圧膜モデルとなる。

本研究の折り畳み解析にはポアソン比1/3の膜材を使用した。これはポアソン比が1/3であるとき、ユニット構造の変形時における補助点位置を求めることなく安定な大変形解析が可能となるためである。ポアソン比1/3の正三角形要素では副材が存在せず、正三角形以外の要素では図-2のように副材は平行でその軸力は要素形状から計算することができる。勿論、ポアソン比が1/3以外の場合でも計算量は増えるものの折り畳み解析は可能である。

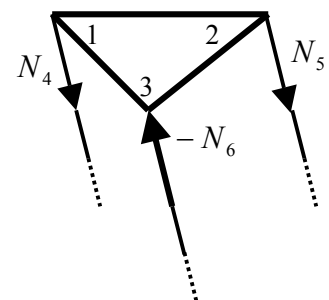


図-2 ポアソン比1/3膜材の線材ユニット構造

3. 筒状膜構造物の折り畳み解析例

以下の折り畳み解析では許容不平衡力を $2.0419 \times 10^{-7} \text{ N}$ として収束判定を行い、ヤング率: 200 N/mm^2 、単位体積重量: $9.02 \times 10^{-6} \text{ N/cm}^3$ 、膜厚: 0.01 cm の膜材を使用している。

先ず、図-3 のように一辺が10cmの正六角形断面を有する高さ34.6cmの筒状膜の折り畳み解析例を示す。上下縁の節点は固定している。図の矢印方向に1N加えた状態から、上縁固定節点を徐々に鉛直下方に下げる強制変位を与えれば折り畳むことができる。

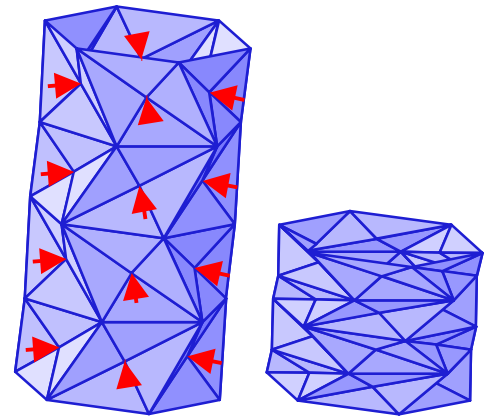


図-3 正六角形断面筒状膜のケース

図-4 と図-5 は一辺が4cmの正方形断面を有する筒状膜の折り畳みである。2つの例ともに上下縁の4隅の節点を固定している。

図-4 は上縁4固定点を断面重心軸周りに90°回転させた後、鉛直下方に下がり折り畳むシミュレーションである。図-4(a)の初期状態から上縁4固定点を45°ステップの回転変位を2

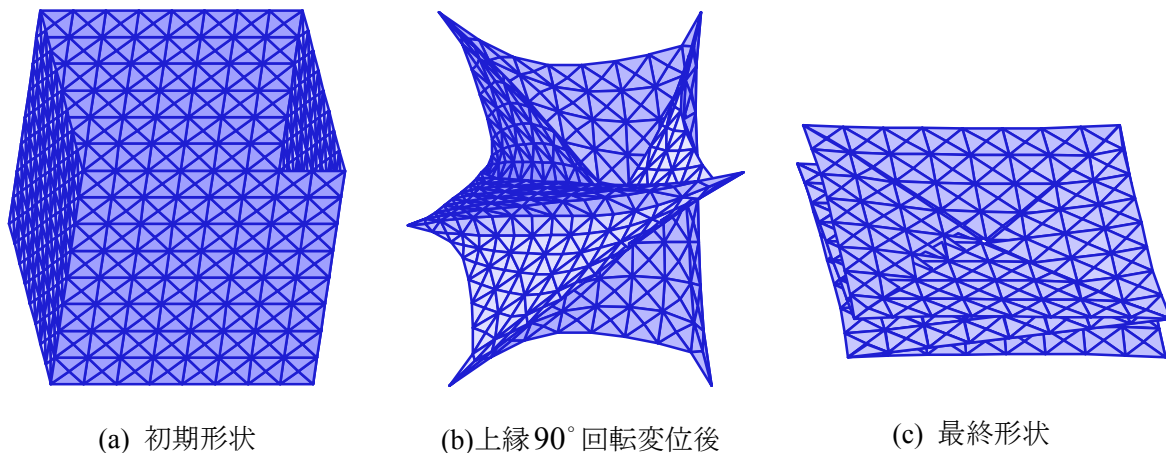
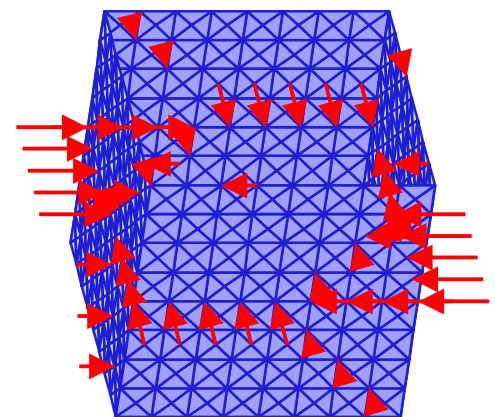


図-4 正方形断面の筒状膜のねじり畳み

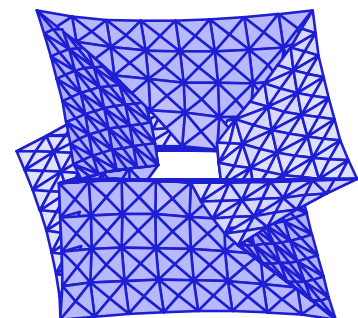
回与えれば図-4(b)の形状となる。次に、上縁4固定点を徐々に下げる強制変位により最終形状として図-4(c)を得た。

図-5 は(a)の初期形状に図の矢印方向に荷重を架けるとともに上縁4固定点を徐々に鉛直下方に下げることにより折り畳むものである。

ここに示した何れの例もニュートン・ラブソン法により比較的少ない反復回数によって平衡解を得た。しかし、折り畳み法はこの他にもあり、なかには膜同士の接触や平衡解を得ることが困難な折り畳み法が存在する。シミュレーション解析の容易性は機械的な折り畳みの容易性と通じる点があるように考えられ、講演時には折り畳み法の評価として説明する予定である。



(a) 初期形状



(b) 折り畳み途中形状

図-5 圧縮畳み

参考文献：井嶋克志、帯屋洋之、川崎徳明：空間柔ケーブルによる非抗圧膜構造モデルの有限変位解析、構造工学論文集, Vol55A, pp.11-22, 2009.3.