

折りたたみ/展開の可能な小型膜構造モデルの製作

野島武敏^{*1}、多田章二^{*2}、勇田篤^{*3}、日下貴之^{*4}、武田英徳^{*1}

梗概

宇宙構造物の設計用に開発された矩形膜、円形膜、円筒、円錐形状膜等の折りたたみ収納法、及びこれらを基に考案されたパラボラ面、球や楕円球状等の回転形状膜の折りたたみ技術を応用して、容易な折りたたみ/展開の可能な膜構造を製作することを目的として、1.6~2mの小型のトラス膜構造を試作した。本報告はこれらを設計するための折りたたみの幾何学的な基本関係と基本的な折りたたみモデル、及び製作した一軸の収縮構造、半楕円球及び半円球状構造及びらせん型の巻取り構造とこれらの製作上の問題点について述べたものである。

1. 緒言

代表的な宇宙構造物は通信用アンテナで、その大きさは10~20mである。最も巨大な宇宙構造物は米国の軍事衛星と言われ、大きさは100mに達する。現在、宇宙科学研究所が10年を目標に計画する太陽風を受けて航行する宇宙ヨット(ソーラーセイル)の寸法も100m級のもが想定されている。将来的には成層圏プラットフォームの建設、あるいは1~10kmに及ぶ大きさの宇宙発電所が計画される等、宇宙構造は益々巨大化の傾向にある。このような大型構造をロケットのフェアリング部に収納するためには、高能率の収納方法の開発が不可欠である。これらの衛星部品を宇宙に搬送するコストは建設費の大部分を占める。コスト削減と大型化に対応するため、1996年に膨張型のインフレーション構造がSpartan207衛星でNASAにより試された¹⁾。将来、このインフレーション構造が宇宙構造建設の主流になると言われている。このような現状のもとで、これらの宇宙構造においては、容易な展開のみを考え、使用後の収納方法までの配慮がなされるまでに達していない。

一方、地球上においても300m直径のミレニアムドームに見られるように、膜構造は益々大型化の傾向にあると思われる。また万博やサーカス等の比較的短期のイベント用の膜構造も数10mサイズと考えられる。今後、これらの構造においては地球環境の問題から再利用化の要請が益々強くなると考えられる。このことを容易ならしめる一つの方法として、構造自体を折りたたみ式にする方法がある。この折りたたみ化が実現されると、輸送や

建設コストを軽減出来ることが期待されるとともに、危険な環境下における現場作業の縮小や工期の短縮化等をもたらすものと考えられる。すなわち簡素で効率的な折りたたみ/展開技術の開発は宇宙構造の建設のみならず、地球上における膜構造の建設に多大のメリットをもたらす夢を秘めていると考えられる。

本報告は著者の一人が開発して来た矩形、円形、円筒及び円錐形状膜の折りたたみ収納法、これらを基に考案した球、楕円球殻等の折りたたみ法^{2~11)}を応用して、一軸方向に折りたたみ可能な小型の膜構造、半球、半楕円球形膜等を製作し、これらの製作の可能性を検討した結果について記述するものである。

2. 折りたたみの幾何学的基本関係

折り線が合流する点を節点とする。この節点で折りたたみ条件が満たされる時、折り線数は4、あるいは6本等、偶数個で構成されることが分かっている。1節点4折り線の場合の折りたたみ条件は折り線のなす角を図1(a)に示されるように定義すると

$$\alpha = \gamma \quad (1)$$

で与えられる^{2, 3)}。ここで実線; 山折り線、破線; 谷折り線である。1節点6折り線の場合は図1(b), (c)のようになり、折り線のなす角を図に示されるように定めると、次式で与えられる⁴⁾。

$$\beta - \alpha = \delta - \gamma + \theta \quad (2)$$

$$\alpha^* = \theta_2 + \theta_4, \beta^* = \theta_1 + \theta_3 \quad (3)$$

図1(a)に対応する図2(a)の折り線③を山から谷へ、④を谷から山折り線にすると、図2(b)になる。この場合も折りたたみ条件

*1 京都大学大学院工学研究科、航空宇宙工学専攻

*2 京都大学工学部、物理工学科、宇宙基礎コース学生

*3 立命館大学理工学部、機械工学科、修士大学院生

*4 立命館大学理工学部、機械工学科

式(1)が成立つ。すなわち、4折り線の場合には1つの折りたたみが出来れば、もう一つ別の方法で折りたたむことが出来る。これは通常、我々が行っている折紙遊びで様々な構造を創製出来ることを示す(折りたたみの表裏性)⁴⁾。図2(c)は、山折り線②、③のなす角を2等分する線を①、これに直交する線を④とすると①に対して②を入射光、④を反射光とみなせ、④に対して、②、③も同様になる。すなわち、鏡面と考える直交する2本の直線の交点を節点として、この点でジグザグの折り線を交叉させると、自動的に折りたたみ条件が成立つ。この特性を直交鏡面則⁴⁾となづける。これは円形膜等の折りたたみ法の設計や折りたたみ条件を検証する場合に極めて有用である。

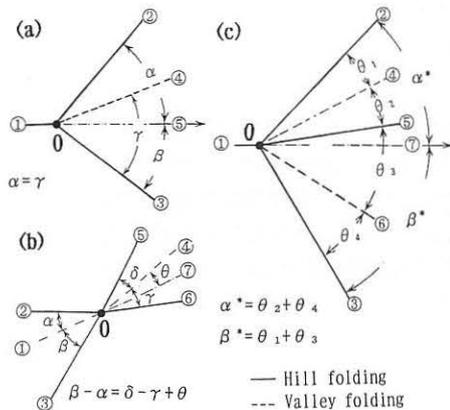


図1 節点で完全に折りたたむための角度関係

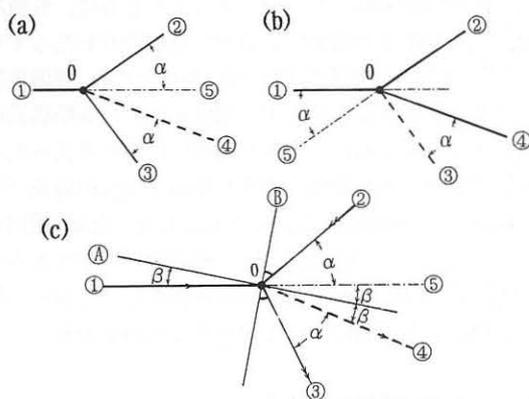


図2 折りたたみの表裏性と鏡面則

図3に本報告で用いる代表的な折りたたみ法の基本形を示す。図3(a)は垂直方向の折り線と水平方向の折り線がジグザグに繰返されるもので、DC(double corrugation)折り、あるいは欧米ではSaddlerの陰影折りと呼ばれており、一方向を直線の折り線に

したものを我国ではミウラ折りと呼び、近年地図の折りたたみにも用いられ始めた。この折りたたみ法を平面折りと呼ぶ。各節点で折りたたみ条件が成立つことは上述の鏡面則で説明される。図3(b)は図3(a)のジグザグ線を交互に逆転したもので、これを繰返すと曲面が形成されるため、これを円筒折りと呼ぶ。図3(c)は図3(b)の点A、B及びC、Dを一致させて、1節点6折り線にしたもので折りたたみの機能性は図3(b)と全く同様であるが、節点の変位が6折り線で拘束されるため、構造体の安定性を得たい場合に有用である。図3(d)、(e)は1節点6折り線における最も簡単な折りたたみの例で、2本の山折り線が直線の場合である。図中の角 β が等しい時、折りたたみ条件が成立つ。図3(f)は一方向直線の陰影折りのジグザグの折り線を(鏡面則に従い)、交互に α 、 β ($\alpha \neq \beta$)としたもので、曲面状に折りたたまれる。折りたたみの例の様子を各々図3(g)、(h)に示す。野島と多田はこの折りたたみ収納法を、凡そ50倍の寸法に展開させるソーラーセイルのモデルの一つとして採用し、現在その詳細な検討を行っている。平面折りと円筒折りを組み合わせると平面紙を様々な形状で折りたたむことが出来る。図3(i)に展開時に六角形断面の筒状となる構造の展開図の例を、これで作られた六角筒と折りたたみ後の上面と側面からの様子を図3(j)と(k)に示す。筒は点A、Bで60°曲げられるように、円筒折りで作図され、各辺はDC折りで構成されている。このDC部の個数は任意に取ることが可能で、この部分を長くする程収納効率(収納後寸法/展開時寸法)が飛躍的に上

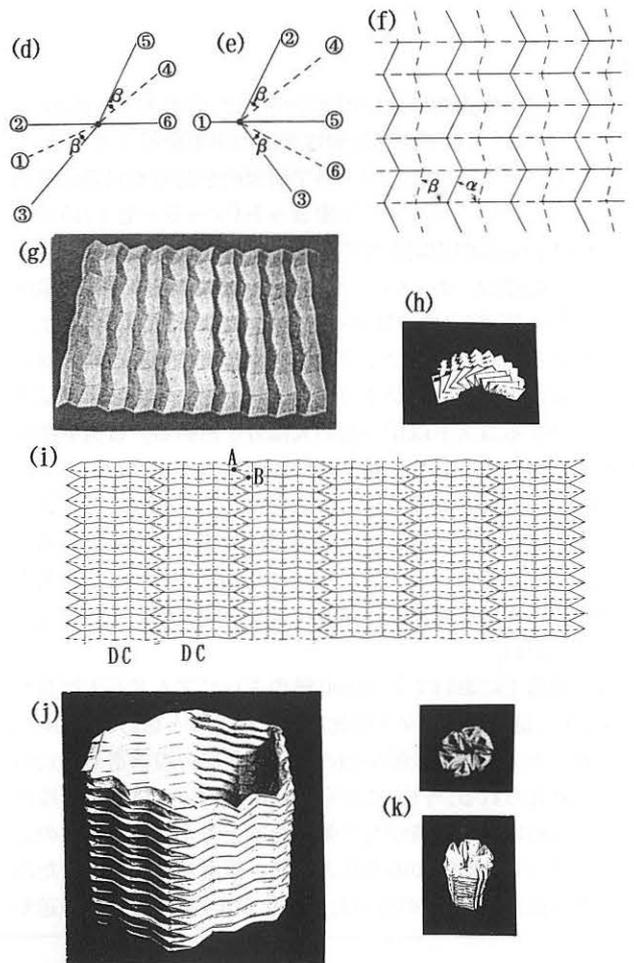


図3 折りたたみの展開図の基本的な応用例

り、巨大な構造を極めて小さく収納し得ることが分かる。

図3(m)、(n)に折りたたみ可能な円形膜の展開図⁴⁾とこれを半径方向に折りたたんだ様子を示す。半径方向のジグザグの折り線は鏡面則に基づいて描かれている。図3(p)に等角ら旋状の2つの折り線群で描かれた円形膜の展開図の例、これを中心回りに巻取った様子を図3(q)に示す⁵⁾。この展開図は図1(a)の折りたたみ条件と円形膜上のら旋の連続条件及びら旋の配分条件を組合わせて、数理的に得たものである。

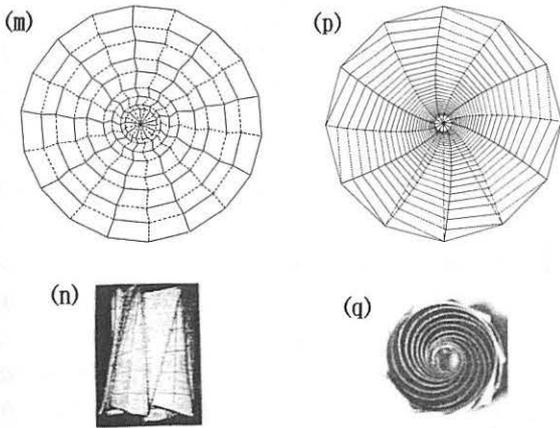


図3(続き) 折りたたみ方法の基本的な応用例

3. 平面折りと円筒折りを組合せた一軸の折りたたみ型膜構造

図1の折りたたみ条件と鏡面則を考慮に入れて、平面折りと円筒折りを組合せると矩形膜を様々な形、例えば、 Δ や Π 型に折りたたむことが出来、一軸方向に折りたたみ可能な膜構造を設計することが出来る。図4(a)、(b)にそれらの展開図の例を示す。図4(a)のAが天井部、Bが側面部になる。図4(b)は図3(i)を用いたもので、側面部BはDC折りである。DC折りでは折り線のなす角が 90° に近づく程、収納効率が上がる。この展開の欠点は天井部Aが

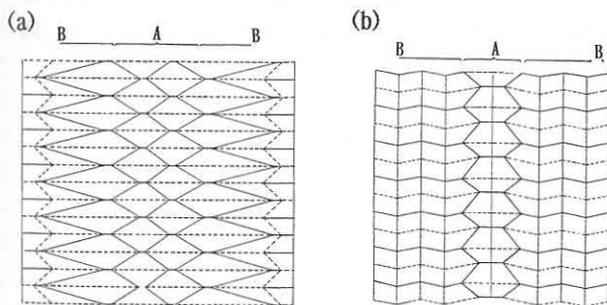


図4 矩形平面膜の折りたたみ法を用いた膜構造の例

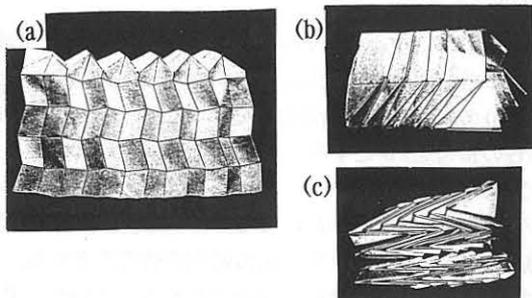


図5 図4(b)の展開図で作られた構造と折りたたみ後の様子

膜構造としては不適なflatになることであるが、これは図4(a)のように天井部分に円筒折りを偶数個導入することで解決される。図5(a)に図4(b)をもとに製作した長手方向が2mm弱のモデルを示す。ここでは折り線に沿って4mmのアルミパイプがトラス部材として用いられ、節点部はゴム製のジョイントが用いられている。折りたたんだ時の側面と底面状態を図5(b)、(c)に示す。接地点部分を固定すると、比較的安定な構造になるが、この構造は基本的に4折り線で構成され、膜に剛性があっても折りたたみが可能なため、膜自身がなんらかの剛性を有すれば、構造体の安定度は更に向上する。

4. 円筒、円錐形状膜の折りたたみモデル

折りたたみ可能な円筒及び円錐形状膜の展開図が数多く報告されている^{2, 3)}。これらのうち、代表的なものを図6(a)~(c)に示す。図6(a)は円筒を1節点6折線で構成したら旋の展開図の最も基本的なもの、図6(b)は一段毎にら旋を逆転させた反転ら旋型の展開図である($\beta=30^\circ$, α ;任意)。図6(c)は図6(a)を基に1節点4折線で構成したもので、ペットボトルのような剛性のある膜製の円筒の折りたたみに用いる目的で開発された。図7(a)~(c)は円筒の折線図から得られる円錐形状膜の展開図で水平の折り線と等角のら旋状折り線の組合せで構成されている。これらの展開図は等角写像による数学的変換によっても得られることが明らかにされている¹⁰⁾。円筒の展開図における各節点の折りたたみ条件は図3(d)、(e)の例により明らかである。このように閉じた構造においては、節点での折りたたみ条件に加えて、折りたたみ後、円周方向に閉じる条件が満たすことが必要である^{3, 4)}。この条件は、展開図の水平方向の要素数を N とする時、図中の角 β を $2\pi/(2N)$ とすることで満たされる。円錐の展開図においては、最初、頂角 θ だけ図が湾曲しているから図中の角 β_0 を $(2\pi-\theta)/(2N)$ とすると、円周方向に閉じる条件が満たされる。図7(c)は図7(b)の β_0 を各段で同一に選び、 α 値を各段で自由に選択した場合の展開図である。図7(d)は図7(c)の一つの節点を表したも

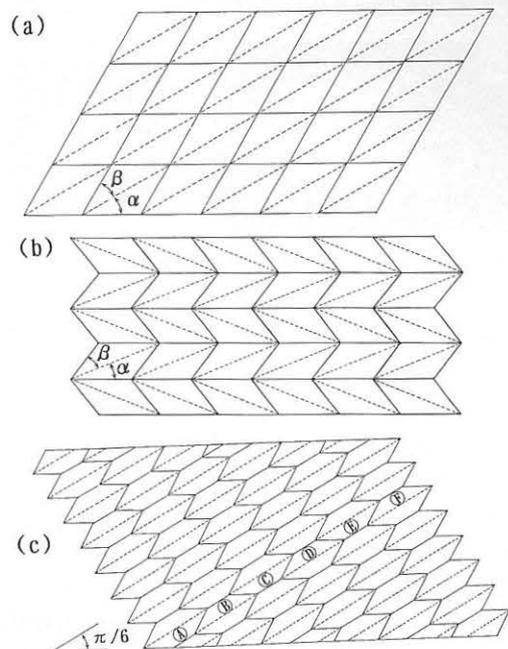


図6 折りたたみ可能な円筒展開図の例

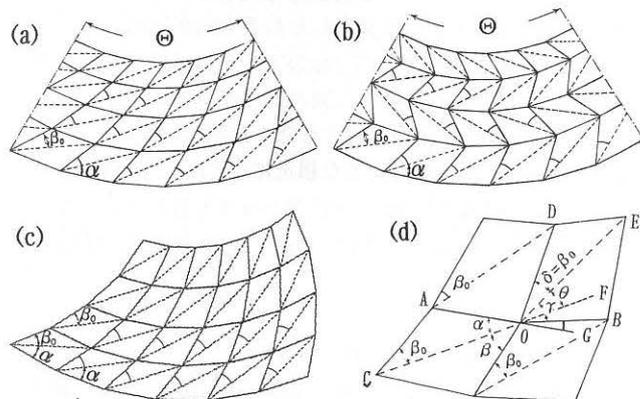


図7 折りたたみ可能な円錐形状膜の展開図の例

ので、節点0まわりの角度を図のように定め、辺A0の延長線をOG、折り線C0の延長線をOFとする。頂角 Θ の扇型をNの円周方向の要素に分ける場合には、 $\angle BOG = \Theta/N$ であるから、図1(b)の θ は $\theta = \gamma + \Theta/N$ となる。この関係と $\beta = \beta_0 + \Theta/N$ 、 $\delta = \beta_0$ を式(2)に用いると、折りたたみ条件が成立していることが分かる。すなわち、各段で同一の β_0 を選択すると、各段の形状を任意に選んで円錐形状膜の折りたたみの設計を行うことが出来る。これは反転ら旋型の展開図についても同様である。

ら旋型の円筒や円錐は上端が回転しながら折りたたまれるが反転型のら旋構造はこれを回避することが出来、折りたたみ構造を製作する際、有用であることが多い。図7(b)や(c)の反転型のら旋の展開図の水平方向に3あるいは4個を用いると、図4のような一軸型の折りたたみ収納構造が作られる。図8(a)に六角形で構成される図7(a)の展開図より円周方向に4個取った展開図を対称に2個接合して製作されたモデルとその折りたたみの過程の様子を示す(図8(a))。このような構造は任意の多角形に対しても可能で、角数が増える程、造形性が増すように思われる。

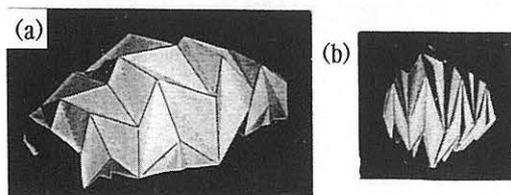


図8 円錐形状膜を対称に接合した場合のモデルと折りたたみ

図6,7の折りたたみ型の膜モデルに展開機能を与える場合、①宇宙構造物の展開方法として考えられている膜構造の上下端を閉じて、空気圧で展開する方法、②膜を2層で構成して、層間に空気を注入して展開する方法、あるいは③折り線部をトラス構造にしてこのトラス部材を駆動する方法等が考えられる。ここでは最も簡単で、大型の構造にも対応し得ることを考え、③による展開方法を採用する。

図6(b)の展開図をもとに、ビニール膜でコーティングした薄紙製の膜を用いて高さ方向に約2m大の六角形断面の擬円筒小型モデルを製作した。この構造の外観と展開の様子を図9に示す。ここで、展開図の折り線部に4mm直径のアルミパイプを配置して

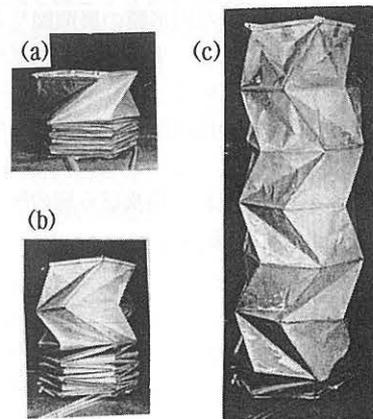


図9 製作された円筒(六角形筒)形状の小型構造の展開の様子

トラス構造とし、節点部は市販のゴム円管を接合してジョイントとした。このモデルでは宇宙構造物の支柱を想定し、鉛直の折り線に当るトラス部材に沿って薄いビニール膜管を接合し、これに空気を注入することで展開実験を行った。展開及び折りたたみの挙動は良好で、比較的簡単にこの構造を駆動することが可能であることが確認された。

5. 3次元膜構造の製作

5.1 3次元回転形状膜の輪切りによるモデル化

図10のように、任意形状の断面形状を有する回転形状の膜構造を回転軸(Z軸)に垂直な平面でM個に輪切りする。この輪切りされた鉢巻き状の要素を切り開くと、扇形になり、これを輪切り扇形要素([1],[2]...)と呼ぶ。この輪切りされた円錐台形状要素で回転形状膜を近似する。扇形要素を更に概略平行4辺形に分割したものを基本要素(①,②...)と呼ぶ。ここでは、この(平面)の基本要素を基にして、多面体の回転膜構造を作る最も簡単な場合を扱う。扇形要素を概略平行4辺形に分割する時、図10のように異方向に交互に分割すると、ジグザグ型(反転型)になり、同方向にとるとら旋型になる。

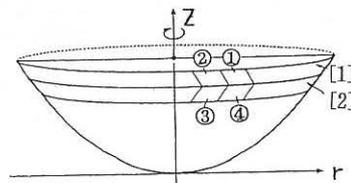


図10 3次元膜構造の輪切りモデル

5.2 展開図の作成

図11(a)のように中心角 Θ の扇型(外周半径 R^*)上の外周部に幅Lの湾曲した帯板ABCDを取る。この左右の両端AB, CDを接合すると図11(b)のような円錐台形になる。この円錐台の底面半径を R' 、円錐台の頂角を 2θ とすると、次式の関係が得られる。

$$\Theta = 2\pi \sin \theta \quad (4)$$

図10のお碗型の形状を $z=f(r)=c(r/r_1)^2$ で表し、これをZ軸回りに回転して得られるパラボラ面形状の膜構造を考える。ここでパラボラ面の上端の半径を r_1 、 $c=0.8$ とする。このパラボラ面をZ軸に垂直な平面で10分割し、これを輪切り要素①~⑩とする。

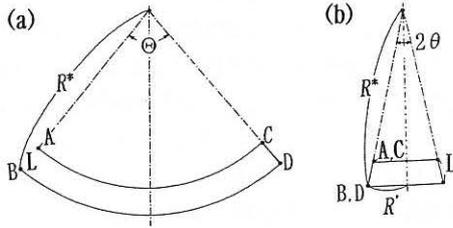


図11 輪切り要素と扇型要素の関係

輪切り要素の上端の半径を各々 r_1, r_2, \dots, r_{10} とする。10個の円錐台要素の図11(a)の Θ を各々 $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{10}$ とする。輪切り要素(i)の内径と(i+1)の外径は等しいから、一般に次式が成立つ。

$$2\pi r_i \Theta_i = 2\pi r_{i+1} \Theta_{i+1} \quad (5)$$

図12で示されるように、切断半径が $r_2=0.9r_1, r_3=0.8r_1, r_4=0.7r_1, \dots$ となるよう輪切りする。10個の扇形要素を切り開いて展開した時の各要素の長さ L_i 、及びこれらの要素の頂角 $2\theta_i$ が図12(a)より算出される。すなわち式(4)より各要素の Θ_i 値が決まる。要素①の幅は L_1 でその外周長さは $2\pi r_1$ である。この幅と長さの比をアスペクト比として、 $\kappa_1=L_1/2\pi r_1$ と置く。この扇形要素を半径 R_0 の円上に描く(図13(a))。この図上で要素[1]の頂角は Θ_1 であるから、外周長は $R_0 \Theta_1$ となる。この要素[1]の図13(a)上での幅を l_1 とすると、 $l_1=\kappa_1 \Theta_1 R_0$ と与えられる。すなわち $l_1=(L_1/2\pi r_1) \Theta_1 R_0$ になり、無次元幅 l_1/R_0 は $L_1 \Theta_1 / (2\pi r_1)$ と与えられる。他の要素についても同様に $\kappa_i=L_i/(2\pi r_i)$ と置いて

$$l_i/R_0 = \kappa_i \Theta_i \quad (6)$$

で表される。扇形要素iの外周半径を $(R_i)_0$ 、内周半径を $(R_i)_i$ で表すと

$$l_i = (R_i)_0 - (R_i)_i \quad (7)$$

$$(R_i)_i \Theta_i = (R_{i+1})_0 \Theta_{i+1} \quad (8)$$

の関係が成り立つ。式(5)~(8)を用いると要素[1], [2]...順に上述の諸値が求められる。得られた展開図を図13(a)に示す。

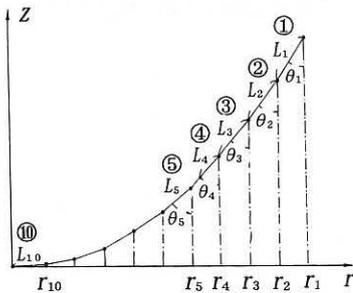


図12 パラボラ面形状の切断面と L_i と θ_i の定義

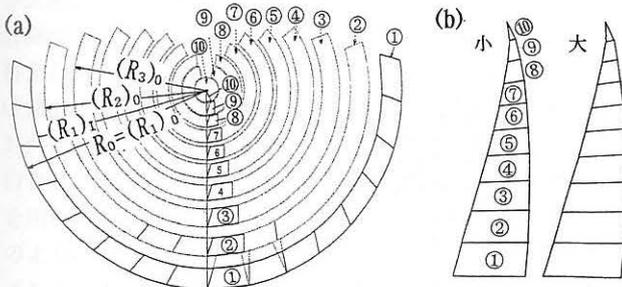


図13 パラボラ面の基本要素切断法(a)、不等分法による湾曲要素(b)

次に、図3(m)の等角ら旋の組合わせで、円形膜を軸回りに巻取る方法にならって、図13(a)に示されるように半径方向と角 ϕ をなす角で展開図上に分割線を描き、扇形要素を $2N(N=8)$ 個に“等分割”する。分割して得られた基本要素を半径方向に積上げると新たに湾曲要素が作成出来る。この湾曲要素を16個接合し、接合線を交互に山、谷折り線とすると、ら旋状の折り線を持つパラボラ面状膜が得られる。この構造はZ軸回りに巻取るように収納されるが、膜が厚い場合には中央部で巻取りが窮屈になって、収納が困難になる時がある。円形膜の解析において⁹⁾、上で行った等分割を不等分に分割にすると下方にずれながら巻取られること及び不等分比を大きくするとこれが顕著になることが明らかにされている。これを参考にして、図13の扇形要素を分割する際、最初8等分し、次にこれを不等分に分割する。8等分した後、これを中心角度比で $0.475/0.525$ で2分割して得た2種の湾曲要素を図13(b)に示す。ここで中心角の小さな要素の左方を山折り、右方を谷折りにするとこのパラボラ面も同様に下方にずれながら巻取ることが出来る。

上の考えに従って下端直径約2mの膜構造を製作した。ここで要素①~⑦を用い、中央部の3要素は内角 320° の扇形要素1つで代用した。この構造の側面、及び上面からの外観を図14(a), (b)に示す。この構造はPVC膜製で、半径方向のら旋に沿い柔軟な12本のアクリル棒が設置され、円周方向は3本のアルミパイプで強化されている。展開はら旋方向に設置したアクリル棒に薄いビニール膜円管を設置し、これらに市販のポンプ(最高吐出圧力2気圧)で空気を注入して行った。すなわちこの構造は、展開時、これらの空気柱で保持されており、展開は極めて容易に行われることが確認された。巻取り状態を図14(c)に示す。全ての要素①~⑩を用いて製作した場合の折紙モデルの折りたたみ後の様子は図14(d)に示されるようになり(等分割された円形膜の巻取り図、図3(q)参照)、巻取り収納はこのモデルと同様に行い得ることが分かった。巻取り後の収納率は約1/6である。

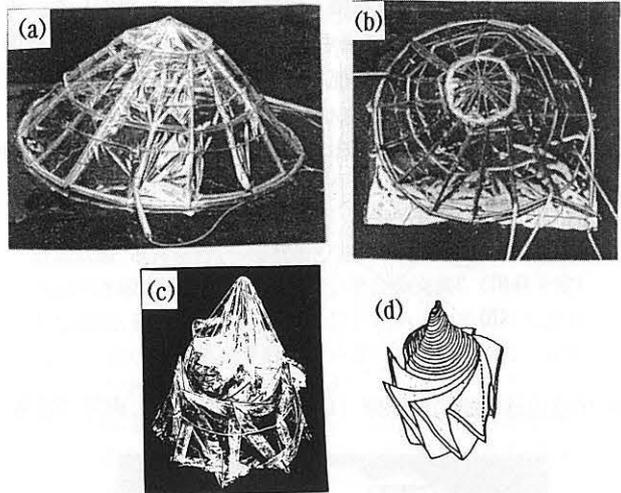


図14 略パラボラ面の膜構造とその巻取り収納の様子

5.3 折りたたみ型の半楕円球状膜及び半球状膜構造のモデル化

図7(a)~(c)で各段の α 値を任意にして、 β_0 値を円周方向に閉じる条件を満たすように設定すると、各段の境界での折りたたみ条件が成立つことが明らかにされた。この特性と全く同様に図13のように各要素の Θ 値が異なる扇形要素を接合した場合で

あっても、これらの要素が個別に円周方向に閉じる条件を満たす限りにおいて、接合部での折りたたみ条件が成立することが既に著者の一人により幾何学的に明らかにされている^{8, 9, 11)}。すなわちこの特性を用いると、任意形状の膜構造を図8のように軸方向に完全に折りたたむことが出来る。この方法を用いて、折りたたみ可能な楕円球状膜や円球状膜構造を製作する方法を以下で述べる。

図15のように楕円球及び球状膜の回転軸をZ軸とし、水平の対称面(Z=0)が膜となす円を赤道、慣用に従って、これと平行及び垂直な円群を緯線及び経線と呼ぶ。これらをZ軸に垂直に水平面で輪切りする。これを切り開いて得られた頂角 Θ_i の異なる扇形要素の各々を円周方向に閉じる条件を満たすように $(\beta_0)_i = (2\pi - \Theta_i) / (2N)$ を算出して分割し、基本要素を作る。得られた基本要素を図13(b)のように積上げると湾曲要素が、交互に異方向に分割するとジグザグの要素が得られる。これらの横端面を貼り合わせると、Z軸方向に折りたたみ可能な略楕円球あるいは略球形状膜が得られる。これらの構造を折りたたむと、Z軸方向に完全に折りたたむことが出来る(半径方向の収縮はない^{9, 11)})。

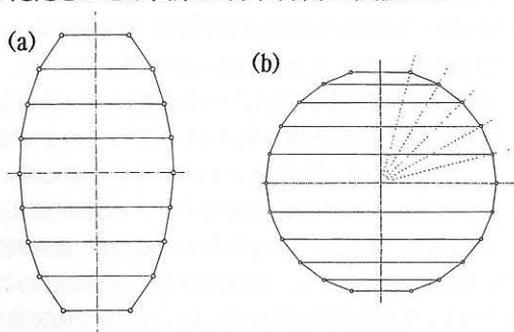


図15 半球及び半楕円球状膜の輪切りによるモデル化

5.3.1 略半楕円球状膜構造の製作

図15(a)の輪切りで得られる扇形要素を反転ら旋型になるようジグザグに9分割し、これを積上げて湾曲要素を製作した。得られた湾曲要素を図16(a)に示す。これらの湾曲要素を6個(側面部は図16(b))用いて、トラス部材で構成した半楕円球状膜を製作した。トラス部材として直径4mmのアルミパイプ及び簡易ゴムジョイントが用いられた。製作された半楕円球状のトラス式膜

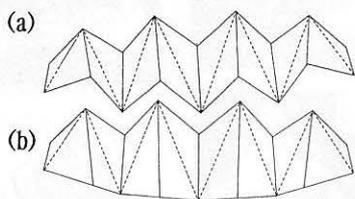


図16 半楕円球状膜の展開図 ((a)中央部;4個、(b);両端;各1個)

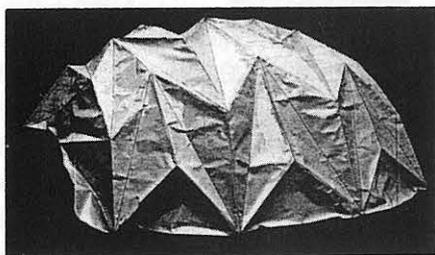


図17 製作された半楕円球状トラス型膜モデル(Z軸;水平方向)

構造(長手方向寸法;約1.7m)の外観を図17に示す。この構造は接地するトラス部材を固定すると安定な構造になり、図16の展開図の折り線がなす模様を細かくする程、安定になる。この構造は図8の円錐台2個の組合わせからなるモデルの外観を滑らかにしたものに対応し、折りたたみ後の様子もこれと同様である。この構造は左右の開口端で構造上の緩みが生じることに問題があり、この点の改良が残された課題の一つである。

5.2.2 略半球状膜構造の製作

図17の折りたたみ式の半楕円状膜と同様の手順で半球状膜を製作することが出来る。これらのモデルは、軸方向には完全に折りたたまれるが、半径方向の収縮はなかった。ここでは円形膜の折りたたみモデルを基に軸方向の完全な折りたたみに加えて、半径方向にも収縮する3次元膜構造のモデル化を考える。

著者の一人は提案した数多くの円形膜の折りたたみモデルを球状の膜構造のモデルに変換する方法の検討を行った。結果、ら旋形モデルを球状モデルの展開図に変換する解析法が現状では難しいことから、図3(m)に示された鏡面則に基づいて得られた半径方向のジグザグモデルを基にして、最初、この円形膜を平面上に折りたたむ方法を検討した。新たに考案された円形膜を平面上に折りたたむことの可能な展開図の一例を図18に示す。ここで元のジグザグの折り線(図3(m)参照)を全て山折りとし、円周方向に閉じる条件を満たすよう新たに谷折り線を追加した。このような展開図を基に、半径方向にも収縮する球形状膜の折りたたみ法を開発した。最初、図15(b)に示されるような手順で球形状膜と10°毎に引かれた放射線の交点がなす点を結んだ円(緯線)を得、これらでZ軸方向に垂直に18個に輪切りする。輪切りして得た扇型要素を分割数Nを12として分割して基本要素を得る。この分割は図11のように要素①、②...についてジグザグとし、分割する角度は扇型要素上で鏡面則に従って行うものとする。得られた基本要素を、図13を得たのと同様にして積上げると、ジグザグ要素が得られる。Z>0部分の半球について、12個の湾曲要素を一つの図面上に描くと図19(a)となる。

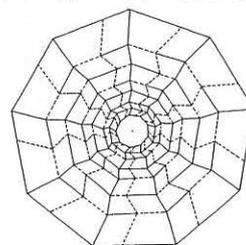


図18 円形膜の平面上への折りたたみモデル^{8, 9)}

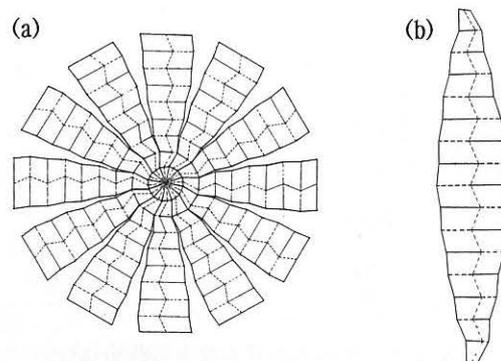


図19 半円球状膜の展開図(a)及び球状膜のジグザグ要素(b)

球形膜は図19(a)の1つのジグザグ要素を対称に設けることによって得られる要素(図19(b))を12個接合することにより得られる^{7, 8)}。これによって作られた半球状膜を図20(a)に、折りたたみ後の上面からの様子を図20(b)に示す。

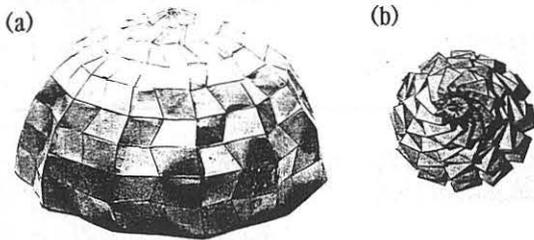


図20 半球折紙モデル(20)とその折りたたみ状態^{8, 9)}

小型の膜トラス構造は図19(b)の湾曲要素6個をのジグザグの経線部分を接合することで製作された。製作された1.6m径の小型の構造を図21(a)に示す(Z軸;水平方向)。この構造の節点部では経線方向にはゴムジョイント、緯線方向には市販の金属製ジョイントが用いられ、これらにトラス部材(4mm径アルミパイプ)を接合して全体の構造が保持されている。この膜構造を折りたたんだ状態を図21(b)に示す。折りたたみ後、半径方向には凡そ1/3程度に収縮して収納されている。

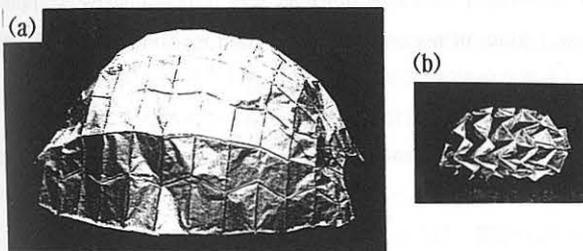


図21 製作された小型半球膜構造とその折りたたみ状態(Z軸;水平方向)

4. 考察

著者の一人が開発して来た円筒、円錐、円形膜等の折紙モデル及びこれらを基に考案した球形膜や楕円球状膜の折りたたみ法を用いて、2m前後の寸法の小型の膜構造モデルを製作して実用化の際の問題点を調査した。結果、折紙モデルでスムーズな折りたたみ/展開の可能なモデルはトラス構造にしても折りたたみ特性に大きな問題が生じないこと、すなわち折りたたみ/展開の機能性は折紙モデルで大略予測し得ることが分かった。しかしながら全般的な問題点として、1節点6折り線で構成されるトラス構造では大きな問題はないが、1節点4折り線で構成される展開図は矩形要素で構成されるため、折り線をトラス部材に置替えた構造は基本的に不安定である。これを補うためには、例えば節点のジョイントの剛性を強化すること(図21)や矩形要素の対角に(折りたたみ線としない)ダミー部材を導入すること、膜自身にある程度の剛性(図5)を持たせること、あるいは空気圧等を用いて構造を保持する(図18)等の工夫が必要になる。またこのような折りたたみ構造を実用化するためには、高性能のジョイントを開発することが不可欠であること等が判明した。

個別の課題として、一軸の収納モデルは様々な形状のものが考えられ、そのデザインはほぼ無限にあるため、目的に応じた設

計を行わなければならないこと、半球状膜や半楕円球状膜では開口部を設けた場合、例え6折り線法を用いても、この部分で構造的な緩みが生じることへの力学的な対策、らせん形の巻取りモデルについては所定の展開形状を得るためには膜の剛性と空気柱の剛性の連成する問題を解決しなければならないことなど数多くの課題が残された。また解析的に未解決のらせん様式による3次元膜構造の創製の問題も残された大きな課題である。

しかしながら、製作された小型モデルを更に改善することで実用化の可能性が判明したこと、このような構造の展開の駆動力として、空気圧が極めて有効で、例えば、膜を2層にしてこれに空気を注入して展開する慣用の方法にこれらの折りたたみ技術を組み合わせると、新たな構造の創製の可能性を見いだせたこと等の大きな成果が得られた。

5. まとめ

容易な折りたたみ/展開の可能な膜構造を設計するための基礎資料を得る目的で、円筒、円錐、円形膜及び球状膜や楕円球状膜の折りたたみ法を応用して、小型膜構造モデルを製作し、これらの実現の可能性を検討した。折りたたみの機能性については、ほぼ折紙モデルと同様であったが、製作されたモデルの個々の問題については、考察で述べたように数多くあり、このような問題を順次解決出来れば実用化の可能性は大きいと考えられる。

文献

- (1) Gossamer Spacecraft; Membrane and inflatable Structures Technology for Space Applications, ed. by C. H. M. Jenkins, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (2001)
- (2) 野島武敏; 平板と円筒の折りたたみ法の折紙によるモデル化, 日本機学会論文集C, 66巻643号, pp. 1050~56, 2000
- (3) 野島武敏, 折りたたみ可能な円錐殻の創製, 日本機学会論文集C, 66巻647号, pp. 2463~69, 2000
- (4) 野島武敏, 容易な展開を考慮した薄い円形膜の折りたたみ法の折紙によるモデル化-半径方向への折りたたみとアルキメデスのらせん折り線による収納, 日本機学会論文集C, 67巻653号, pp. 270~75, 2001
- (5) 野島武敏, 薄い円形膜の折りたたみのモデル化-等角らせん様式による折りたたみ法, 日本機学会論文集C, 67巻657号, pp. 1669~74C, 2001
- (6) 野島武敏, 亀井岳行, らせん折り線で構成された折りたたみ式円錐殻のモデル化, 日本機学会論文集C (掲載予定)
- (7) 野島武敏, 異なる要素形状の組み合わせからなる折りたたみ可能な筒状構造-異型筒および角錐の折紙によるモデル化 日本機学会論文集C (掲載予定)
- (8) 野島武敏, 折りたたみ/展開技術の工学的応用, 日本セラミックス協会, 第20回高温基礎討論会講演要旨集(招待講演) pp. 13~20, 2001-10
- (9) 野島武敏, 日本機学会論文集C, (投稿中)
- (10) 野島武敏, 亀井岳行, 等角らせん及びその修正らせんを用いた折りたたみ構造, 宇宙構造・材料講演会講演論文集(文部科学省, 宇宙科学研究所) pp. 198~201, 2000-12
- (11) 野島武敏, 武田英徳, 膜構造の折りたたみ法のモデル化, 宇宙構造・材料講演会講演論文集(文部科学省, 宇宙科学研究所) (2001年末, 発刊予定)

謝辞 本研究は2000年度の能村膜構造技術振興財団の援助によってなされた。折紙モデルを小型の構造として製作する貴重な機会を与えられた同財団に対し、記して深甚なる謝意を表す。

なお本報告に記された小型モデルの全ては野島の開発した基

本モデルに従い、京都大学航空宇宙工学科で製作された。これらは同学科3回生、樋渡一晃、西田浩之、4回生、森川哲、工業化学科、3回生、菊池利充君及び他数名の学生諸君の協力で製作されたことを記し、彼等の長期に渡る創造的な協力を感謝の意を表す。

Foldable Small-Sized Membrane Structures Manufactured For Trial

Taketoshi Nojima^{*1}
Shohji Tada^{*2}
Atsushi Yuhta^{*3}
Takayuki Kusaka^{*4}
Hidenori Takeda^{*1}

SYNOPSIS

By applying folding techniques of thin flat squared or circular membranes, cylindrical and conical shaped membranes as well as sphered or ellipsoidal structures which have been developed to design deployable astronomical structures, small-sized membrane structures with facilely foldable/wrapping patterns of thin flat sheets, cylinders and etc. are shortly summarized, and secondly, 5 kinds of manufactured small-sized membrane structures are introduced, and their folding characteristics are discussed.

^{*1} Faculty of Engineering, Dept. of Aeronautics and Astronautics, Kyoto University

^{*2} Student of Dept. of Engineering, Course of Astronautics

^{*3} Graduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, Ritsumeikan University

^{*4} Faculty of Engineering Sciences, Dept. of Mechanical Engineering, Ritsumeikan University