異なる要素形状の組合せからなる折りたたみ可能な筒状構造*
(異型筒及び角錐の折紙によるモデル化)野 島 武 敏^{*1}Foldable Tubes and Conical Shells Consisting
of Differently Shaped Elements
(Origami-Modelling of Non-Circular Tubes and Conical Shells)Taketoshi NOJIMA^{*2}^{*2} Department of Aeronautics and Astronautics, Graduate School of Kyoto University,
Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8501 Japan

The purpose of this paper is to present foldable tubes or conical shells with such non-circular cross-sections as rectangular ones. The developments of these structures consist of the combinations of two or more kinds of differently shaped structural elements, which form spiral configurations. Several kinds of such foldable tubes as well as conical shells are newly developed. Origami samples of foldable tubes and conical shells have been manufactured and their foldabilities have been checked. It has been assured that all samples are perfectly folded in axial direction.

Key Words: Modelling, Design, Space Equipment, Adaptive Structure, Foldable

1. 緒言

安価な宇宙構造物の構築を目的とし、1996年 spartan 207衛星が打上げられた。ここでは inflatable 形式の展開・収納法が試され、アンテナを保持する strut は膜製チューブをいわゆる「折り本」様に折りたたんだものが採用された⁽¹⁾。このため展開挙動は極めて複雑・怪奇な様相を呈し、これは工学的には極めて危ういように見える。このような構造を的確に制御して展開するには、今後、簡素で機能性に優れた折りたたみ収納法を系統的に開発して行くことが不可欠であると思われる。

このような折りたたみ技法の研究成果は極めて少なく、これを一つの技法として集大成させて行くことは宇宙構造のみならず新たな形の工業製品や民製品の開発に大いに寄与するものと考えられる。実際この技法は折りたたみ収納の可能な PET ボトル等の容器等の試作・開発にも応用され始めて来た。このような製品は輸送コストの削減、廃棄時の減容化等をもたらすとともに、再利用化を促す等、環境保全の観点からの要求にも答える。このような民製品を設計する際には、折りたたみ収納等の機能性のみならず造形性を始めとする様々

な要求に答えられる必要が生じる。

著者は折りたたみ・展開の可能な円筒、円錐殻や円板等を合同又は相似形状の矩形あるいは六角形要素でパターン化した展開図を既に報告した^{(2)~(5)}。これらの展開図を2種類以上の異なる要素の組合せで創製することが出来れば(擬)円筒断面とは異なる異型の断面(例えば長方形断面等)の角筒や角錐等の製作が可能になると考えられる。

本論文は異なる形状の要素群を組合わせて折りたたみ可能な角筒や角錐殻を製作するためのモデルを開発し、この技法が宇宙構造のみならず工業製品や民製品に用いられるための造形性や機能性を付加し、その汎用性を高めることを目的として記述するものである。

2. 折りたたみ可能な筒状構造の基本展開図

簡素な展開が可能な平面紙の折りたたみ法あるいは折りたたみ可能な擬円筒を製作するための基本的な展開図の例を図1に示す。図1(a)は1節点4折り線法の基本形⁽⁶⁾で、垂直方向の折り線が全て同形、等角のジグザグ線で構成されている。これは平面の折りたたみを与える。図1(b)は図(a)の等角のジグザグの折り線を2種類にし、これ等を交互に導入したもので、折りたたむ

* 原稿受付 2001年6月20日。

^{*1} 正員、京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。

E-mail: nojima@impact.kuaero.kyoto-u.ac.jp

と水平の折り線は曲線を形成する。すなわち折りたたみ円筒(角筒)の基本形の一つになる。図1(c)は円筒を形成するための別の基本モデルで、図1(d)はその変形型である。図1(e)は図(d)の台形要素の形状を更に多様化したものである。図1(f)は図(b)のモデルを基に、1節点6折り線にしたもので異型モデルの基本形となる。

図1(a), (c), (d)は同形の平行4辺形, 台形要素あるいは3角形要素からなる。一方, 図1(e), (f)は2種類以上の台形要素からなる。水平方向の要素数を N とすると, 同形の要素で構成される図1(c), (d)のような場合には擬似的な円筒とみなせる正 N 角形の筒状になるが, 図(a)を除く他のモデルでは異形状の筒状構造になる。

Fig.1 Fundamental folding patterns to form foldable tubes

3. 異型角筒のモデル

3.1 1節点4折り線法による異型筒のモデル化 異型のモデルとして考えられる代表的な形状の折りたたみ後の例を図2に示す。ここで, 完全に折りたたんだ時の形状が各々, 十文字型, 菱型, 擬楕円型及び矩形型になるものが選ばれた。図3(a)~(d)は図2の形で折りたたむための展開図を示したものであり, 図1(b), (d)等の原モデルを基に得られた。図3(a)は図1(b)に対応し, 図中2種類のジグザグの山及び谷折り線(水平の折り線となす角: $75^\circ, 30^\circ$)の対4個で構成されている。このため折りたたみ後, 筒状に閉じる条件が満たされている($2(75-30) \times 4 = 2\pi$)。図3(b)~(d)は図1(d)から派生するもので折りたたみ後, 図2の形状を呈し, 筒状構造として閉じる条件を満たすよう水平線との角度が図3(a)と同様に設定されている。

図3の展開図を切断後の展開図の折線が左右連続するよう任意の角度で切断すると各々図4(a)~(d)のらせ

Fig.2 Typical irregular shaped (non-circular) tubes after folding

模様の展開図を得る。例えば図4(a)は図3(a)を線分ABのように傾斜線で折り線が連続するよう切断して得たものである。これらの展開図で得られる異型筒も軸方向に折りたたまれる。また, 図3の基本パターンが円周方向に閉じる条件を満たせば, 切断する傾斜線の角度に関係なく, ら旋型の展開図は折りたたみ後円周方向に閉じる条件を満たす。これらのらせ型の折りたたみ構造の展開図は図3のそれに比して一般に優れ⁽³⁾, 折りたたむと径方向にも収縮する等の特性を有する。

図1(e)の基本パターンを応用すると種々の形状の台形要素で構成されたらせ型の擬似円筒の展開図が得られる。これに基づき図3のような水平の折り線を持つ展開図を得た後, これを傾斜線で切断してらせ型の展開図を作成すると, 図5のような擬円筒状構造を与える展開図が得られる。

Fig.3 Developments of basic folding lines, giving models in Fig.2

Fig.4 Spiral types of fold patterns derived from Fig.3

Fig. 5 A development to form pseud-circular tube consisting of different shaped trapezoids

3.2 1節点6折り線法による異型筒のモデル化

図6に周期的にX軸と角 Θ_1 , Θ_2 をなすzigzagの水平方向の山折り線(DBAC)とY軸と交互に角度 Θ_3 , Θ_4 となすX軸とほぼ垂直方向の山折り線(EAFJ)で構成した4種類の形状の平行4辺形要素を基に描かれた1節点6折り線による折り線図を示す。各節点と角度を図のように定める。 $\angle BAC = \alpha$, $\angle GAE = \beta$, $\angle CAH = \gamma$, $\angle FAH = \delta$ とおくと,

$$\alpha + \beta = \pi/2 + \Theta_1 - \Theta_3, \quad \gamma + \delta = \pi/2 - \Theta_2 - \Theta_4 \quad (1)$$

を得る。式(1)を組合わせて、次式が得られる。

$$\beta - \delta = \gamma - \alpha + \Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_4 - \Theta_3 \quad (2)$$

線分GAの延長線と線分AHのなす角を θ_1 とすると, $\theta_1 = \beta + \Theta_3 + \pi/2 + \Theta_2 + \gamma - \pi$ であるから, 式(1)の β をこの関係式に用いると θ_1 は次式で与えられる。

$$\theta_1 = \gamma - \alpha + \Theta_1 + \Theta_2 \quad (3)$$

節点Aでの折りたたみ条件式は $\beta - \alpha = \delta - \gamma + \theta_1$ であるから⁽²⁾⁽³⁾, この式に式(3)の θ_1 を代入すると,

$$\beta - \delta = \Theta_1 + \Theta_2 \quad (4)$$

が得られる。また式(4)と式(2)より次式が成立つ。

$$\gamma - \alpha = \Theta_3 - \Theta_4 \quad (5)$$

次に, 点Bでの折りたたみ条件は谷折り線BIの延長線と谷折り線BFのなす角を θ_2 とすると, 同様に $\theta_2 = \gamma - \alpha - (\Theta_1 + \Theta_2)$ となるから, 次式で表される。

$$\gamma - \alpha = \Theta_3 - \Theta_4, \quad \beta - \delta = -(\Theta_1 + \Theta_2) \quad (6)$$

これらをまとめると, 折りたたみ条件式(4)~(6)は

$$\gamma - \alpha = \gamma - \alpha = \Theta_3 - \Theta_4, \quad (7)$$

$$\beta - \delta = \delta - \beta = \Theta_1 + \Theta_2. \quad (8)$$

となる。折りたたみ後, 円周方向に閉じる条件⁽²⁾は次

Fig. 6 Geometrical definitions of angles in 1 node with 6 folding lines (zigzag fold lines in both X and Y direction)

式で表される(N : X軸方向の要素数, 偶数)。

$$(N/2) \cdot 2(\beta + \beta^*) = 2\pi. \quad (9)$$

$$(N/2) \cdot 2(\delta + \delta^*) = 2\pi. \quad (10)$$

辺 $AB = a$, $AC = b$, $AF = c$, $AE = d$ と表し, 正弦定理を $\triangle ABF$, $\triangle AFH$ に用いると, $a/c = \sin \delta^* / \sin \gamma^*$, $b/c = \sin \delta / \sin \gamma$ を得る。これらの関係より, 次式を得る。

$$a/b = \sin \gamma \sin \delta^* / (\sin \delta \cdot \sin \gamma^*) \quad (11)$$

同様の手順で下記の関係式を得る。

$$a/b = \sin \beta \sin \alpha^* / (\sin \alpha \cdot \sin \beta^*) \quad (12)$$

$$c/d = \sin \beta^* \sin \gamma / (\sin \alpha^* \cdot \sin \delta) = \sin \gamma^* \sin \beta / (\sin \delta^* \cdot \sin \alpha) \quad (13)$$

更に幾何学的な拘束条件として, 次の関係式がある。

$$\alpha - \alpha^* + \beta - \beta^* = \gamma - \gamma^* + \delta - \delta^* = \Theta_1 + \Theta_2, \quad (14)$$

8個の角度($\alpha \sim \delta^*$)を未知数として, 辺の長さの比 a/b , c/d を与えると, 拘束式は式(7)~(14)の11個あり, 一般に解くことが困難である。それゆえ, ここでは $\Theta_1 + \Theta_2 = 0$ 及び $\Theta_3 - \Theta_4 = 0$ の2つの簡単な場合を考える。前者は $\Theta_1 = \Theta_2 = 0$ で水平の折り線が直線, 後者は $\Theta_3 = \Theta_4$ で垂直方向の折り線が直線になる場合である。

3.2.1 水平方向の折り線が直線の場合 鉛直方向の折り線がzigzagに平行であるから, 角度関係は

$$\alpha = \alpha^*, \beta = \beta^*, \gamma = \gamma^*, \delta = \delta^*. \quad (15)$$

となる。また $\Theta_1 + \Theta_2 = 0$ において, 式(6), (7)は

$$\beta = \delta, \beta^* = \delta^*, \gamma - \alpha = \gamma^* - \alpha^* = \Theta_3 - \Theta_4. \quad (16)$$

で表される。図7に平行4辺形要素の形状, 寸法が水平方向に同じ場合の折り線図を示す。ここで δ 値は式(10)の水平方向に閉じる条件より決まる($\delta = \pi/N$)。2段目の β を δ と等置すると, 式(9)が満たされる。式(2)で $\Theta_1 + \Theta_2 = 0$ 及び $\beta = \delta$ とおくと $\gamma - \alpha = \Theta_3 - \Theta_4$ となり, 式(8)も自動的に満たされる。すなわち図7(b)のように各段毎に $\beta = \delta = \pi/N$ と選び, α, γ は任意の値に選択した展開図でも折りたたみが可能になる。結果として鉛直方向の山折り線はzigzagあるいは曲線状になる。

図7(c)は図7(a)を一つ跳びに逆方向にし, 反復型のらせん状折り線にしたもので, 角度関係は図のようになる。この1節点6折り線法における節点0での折りたたみ

Fig. 7 Examples of folding patterns consisting of zigzag fold lines in Y direction ($\delta = \beta = \text{constant}$).

条件は図中の水平の山折り線(線分A0)の延長線が線分OBと一致するから、 $\alpha + \beta = \alpha + \delta$, $\gamma + \delta = \beta + \gamma$ を同時に満たすことで与えられる⁽³⁾。双方の式ともに、 $\beta = \delta$ となるから、図7(a), (b)の反復型の展開図は自動的に折りたたみ条件、及び閉じる条件を満たす。このことは平行4辺形で展開図を構成すると、閉じる条件だけを満たすように角 $\beta = \delta$ を選ぶと、各段任意の模様で折りたたみ可能な擬円筒の展開図を設計出来ることを示す。

式(11)に式(15), (16)を用いると $a/b = 1$ となる。これは、水平方向の折り線が直線の場合には、平行4辺形寸法が水平方向に異なる折りたたみ可能な(異形状の)展開図を作ることが出来ないことを示す。

図7(c)の反復型のら旋型を用いると平行4辺形の水平方向の寸法長さが異なる場合、すなわち矩形形状で折りたたまれる展開図が得られる。これを図8に示す($N=4$)。この時の各接点での折りたたみ条件は図7(c)と全く同様に成立つ。図中の δ と δ' はその和が $\pi/2$ で、それらは鉛直方向の3角形要素について一定である(δ と δ' 以外の角度は任意)。このことより、反復型のら旋構造は、図7(a), (b)の形のものに比し、折りたたみ条件についての拘束度合が緩やかであることが分かる。

Fig.8 A fold pattern giving rectangular shaped cross section($\delta + \delta' = \pi/2$, $N=4$)

3.2.2 鉛直方向の山折り線が直線の場合($\Theta_3 = \Theta_4$)

このモデルは図9のようになるから、 $\alpha^* = \gamma$, $\beta^* = \delta$, $\gamma^* = \alpha$, $\delta^* = \beta$ となる。式(7)は $\Theta_3 = \Theta_4$ の時 $\gamma - \alpha = 0$ となる。また図6より $\alpha + \beta - \Theta_1 + \Theta_3 = \gamma + \delta + \Theta_2 + \Theta_4$ となるから、 $\Theta_3 = \Theta_4$, $\gamma = \alpha$ とおくと、この関係式は $\beta - \delta = \Theta_1 + \Theta_2$ となり、式(4)も同時に満たされる。すなわち式(4)~(7)の折りたたみ条件は単一の次式で表される。

$$\alpha = \gamma, \quad \beta - \delta = \Theta_1 + \Theta_2. \quad (17)$$

式(8)で $\alpha^* = \gamma$, $\beta^* = \delta$ とおき、 $\alpha = \gamma$ とすると

$$a/b = \sin \beta / \sin \delta \quad (18)$$

を得る。 a/b 値を与え、閉じる条件($\beta + \delta = \pi/N$)を式

Fig.9 Geometrical definitions to form development having zigzag fold lines in X direction

(18)に用いると、 β , δ が数値計算で求まり、式(17)より $\Theta_1 + \Theta_2$ が決まる。図より $a/b = \sin \Theta_2 / \sin \Theta_1$ であるから、得られた $\Theta_1 + \Theta_2$ を用いると Θ_1 , Θ_2 が決まる。 $a/b = 2.5$ と置き、 $N=4$ 及び6の場合の展開図を図10(a), (b)に各々示す。ここで $\alpha = \gamma$ は自由に選択出来る。

Fig.10 Developments consisting of zigzag fold lines in X direction, (a); $\beta = 69.20^\circ$, $\delta = 21.80^\circ$, (b); $\beta = 43.90^\circ$, $\delta = 16.10^\circ$

4. 異なる要素形状の組合せによる擬円錐殻の製作及びこれによる異型角錐殻モデルの創製

4.1 異なる模様による円錐殻のモデル 等角ら旋や反復型のら旋状の折り線を用い、展開図を相似な矩形や6角形要素に分割して、折りたたみ式の円錐殻を創る方法を既に報告した⁽³⁾。この時、要素寸法は中心に近づく程、等比級数的に小さくなり、これを製作加工する際に煩雑な工程が要求された。それゆえここでは、中心に近づく程、等角ら旋が与える寸法より大きくして行く修正モデルを考える(図11(a))。図に示されるように外周上に点A, B, C..., これより小さな半径上に点D, E, F...及びG, H, I...をとる。各点を結んで描いた矩形要素を分割して得られる上側の3角形の左下隅の角($\angle DAE$, $\angle EBF$, $\angle GDH$ 等)を図7(b)のように全て δ_0 とする。点Eでの折りたたみ条件を考える。要素ABEDを分割する線分AEと右上の要素のそれ(EI)のなす角 θ_1 は、 $\angle ADE = \angle BEF = p$ とおくと、 $\theta_1 = \beta_0 + p + \gamma_1 - \pi$ となる。 $\triangle ADE$ の内角の和より $p + \alpha_0 + \delta_0 = \pi$ を得る。 p を消去すると

$$\beta_0 - \alpha_0 = \delta_0 - \gamma_1 + \theta_1 \quad (19)$$

となり、折りたたみ条件が成立つ。これは角 δ_0 を各段毎に一定に保つと折りたたみ可能な擬円錐殻が製作出来ることを示す。この δ_0 値は閉じる条件で決まり、展開図の初期曲がり角を $N\Theta$ として(Θ : 矩形要素の下辺が中心に対して張る角), 次式により決定される。

$$N\Theta + 2\delta_0 N = 2\pi \quad (20)$$

$N=6$ とした例を図12(a)に示す($\Theta = 20^\circ$, $\delta_0 = 20^\circ$)。

図11(b)に図11(a)のモデルで外周から偶数段目の矩形を反対方向にとった反復型のモデルを示す。各点と角度を図11(a)と全く同様に定める。線分EFの延長上に点Jを取る。点Eでの折りたたみ条件は $\angle HEJ = \angle GED + \angle AEB$ と $\angle BEJ = \angle HEG + \angle DEA$ が同時に成立つことである⁽³⁾。 $\angle DEJ = \Theta$ であるから $\angle HEJ = \delta_0 + \gamma_1 + \Theta$, また $\angle JEB = \pi - p = \alpha_0 + \delta_0$ であるから、上の条件が成立つ。この場合の例を図12(b)に示す($N=6$, $\Theta = 20^\circ$, $\delta_0 = 20^\circ$)。

Fig. 11 Geometrical definitions of angles to form development for conical shells (a); spiral type, (b); repeating spiral type (\$\delta_0\$; constant, derived from closing condition)

Fig. 12 Examples of developments for conical shells consisting of non-equiangular spirals

4.2 異型角錐筒の製作 図13に示されるように、外周上の点Aから中心Oに向かうzigzagの山折り線ACDE(①)を考え、この折り線の振り角を\$j\Theta\$ (\$j\$; 正数値、\$\Theta\$; 扇形の微小分割角)とし、半径方向と角\$\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots\$をなすものとする。また同様に点Bから最初、逆方向に向かう山折り線(②)を描き、これが半径方向と角\$\psi_0, \psi_1, \psi_2, \dots\$をなすものとする(振り角;\$k\Theta\$)。このような折り線(①、②)を交互に取って、展開図を作図し扇形を台形形状の要素で分割する。図の中央部の線分AB, DG等が張る角を\$m\Theta\$、また左右の線分IC, JD, FK, GL等のそれを\$n\Theta\$とする。線分IC, KFの延長線上に点M, Nをとる。点Cでの折りたたみ条件は\$\angle ACM = \pi/2 - \{(n/2+j)\Theta + \phi_0\}\$, \$\angle DCM = \pi/2 - \{(j+k+m)\Theta/2 + \phi_1\}\$を等置して、

$$\phi_0 - \phi_1 = \{(k+m) - (j+n)\}\Theta/2 \quad (21)$$

となる。同様に点Fでの条件は次式で表される。

$$\psi_0 - \psi_1 = \{(j+m) - (k+n)\}\Theta/2 \quad (22)$$

\$\angle DCF = \pi/2 - (j+k+m)\Theta/2 - \phi_1\$, \$\angle ICD = \pi/2 - n\Theta/2 + \phi_1\$であるから、点Cでの折りたたみ後の角度\$\Phi \equiv \angle ICD - \angle DCF\$、及び点Fでの折りたたみ後の角度\$\Psi\$は次式で表される。

$$\Phi = 2\phi_1 + (j+k+m-n)\Theta/2 \quad (23)$$

$$\Psi = 2\psi_1 + (j+k+m-n)\Theta/2 \quad (24)$$

折りたたみ後の形状が長方形の場合を考え、\$j=k=1\$とし、各々の頂点が\$90^\circ\$で折りたたまれるとする。長方形の縦横比を与える\$m, n\$を\$m-n=2\$とすると、式(23), (24)は

$$2(\phi_1 + \Theta) = 2(\psi_1 + \Theta) = 90^\circ \quad (25)$$

となる。また、式(21), (22)は次式となる。

$$\phi_0 - \phi_1 = \psi_0 - \psi_1 = (m-n)\Theta/2 = \Theta \quad (26)$$

式(25)で\$\Theta=5^\circ\$と置くと、\$\phi_1 = \psi_1 = 40^\circ\$、式(26)より\$\phi_0 = \psi_0 = 45^\circ\$となる。同様の手順で\$\phi_2, \phi_3, \dots\$が求められ、

Fig. 13 Geometrical definitions of angles to form development for conical shells with irregular shaped cross section

最終的に\$\phi (= \psi)\$の変化は\$45^\circ \rightarrow 40^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 40^\circ\$で与えられる。\$m=3, n=1\$とした場合の展開図を図14(a)に示す。

次に菱形(\$N=4\$)に折りたたむことを考え、\$m=n\$と置く。点C, Fの半径を\$R_1, R_1^*\$とすると\$p_1 \equiv R_1/R_0, q_1 \equiv R_1^*/R_0\$は

$$\begin{aligned} p_1 &= \sin \phi_0 / \sin(\phi_0 + j\Theta), \\ q_1 &= \sin \psi_0 / \sin(\psi_0 + k\Theta). \end{aligned} \quad (27)$$

で表される(\$R_0\$; 外周半径)。同様に点D, Gのそれらを\$R_2, R_2^*\$とすると、\$p_2 \equiv R_2/R_1, q_2 \equiv R_2^*/R_1\$は

$$\begin{aligned} p_2 &= \sin \phi_1 / \sin(\phi_1 + j\Theta), \\ q_2 &= \sin \psi_1 / \sin(\psi_1 + k\Theta). \end{aligned} \quad (28)$$

で与えられる。式(24), (25)の\$\Phi\$と\$\Psi\$の2倍が\$2\pi\$になるとして周方向に閉じる条件を次式で与える。

$$2(\phi_1 + \psi_1) + (j+k)\Theta = 2\pi \quad (29)$$

\$j, k\$値を与えると、未知数の数は\$\phi_0, \phi_1, \psi_0, \psi_1\$の4個であるが、式(27), (28)で\$p_1=q_1, p_2=q_2\$とすると、拘束式の数は式(21), (22), (27), (28)及び(29)の5個になる。そこで、ここでは各段の寸法関係式を\$p_1 p_2 = q_1 q_2\$で与える。これは2つの段を1対と考え、2段毎に節点が同心円上にくる場合を考えることに対応する。このようにすることで、拘束式が1つ減り、数値計算で解ける。\$\Theta=1^\circ, j=1, k=4\$と置くと、\$\psi_1 \approx 62.1820^\circ, \phi_1 \approx 25.3181^\circ, \psi_0 \approx 60.6820^\circ, \phi_0 \approx 26.8181^\circ\$を得る。\$\psi_2, \phi_2, \psi_3, \phi_3, \dots\$もこれらの繰り返しになり、折りたたみ可能な菱形断面の4角錐を得る(図14(b))。同様の手順で図2(a)の星形状の異型角錐殻も創製出来るが、これらの螺旋型については拘束式が多く、現在それらの解は得られていない。

Fig. 14 Examples of developments for conical shells with (a) rectangular, (b) diamond shaped cross sections

Fig.15 Folded/deployed appearances of origami models. (a); for Fig.4 (d), (b); for Fig.4 (c), (c); for Fig.10 (a), (d); from Fig.14 (a), (e); from Fig.14 (b)

5. 折りたたみ例

上述した展開図により得た折紙モデルの代表的例を図15に示す。図15(a)は図4(b)の展開の様子を示すもので矩形形状で折りたたまれた状態から、らせん形状で展開することが分かる。図15(b)は図4(c)の擬楕円筒の折りたたみ状態及び展開状態を示す。図15(c)は図10(a)の水平方向の折り線が zigzag のモデルの展開・折りたたみの様子であり、展開の様子は図15(a)と似るが円形形状で折りたたまれる点でそれと異なる。図15(d), (e)は各々図14(a), (b)の折りたたみ/展開の様子である。ここで図15(d)は完全に平面上におりたたまれるが、一方、図15(e)は少し湾曲して折りたたまれる。これは構成要素の寸法を2段毎に調整して展開図を設計したことによると思われる。

6. 考察

折りたたみ可能な円筒、円錐殻等の既報の同形、あるいは相似な形状要素で分割して展開図を構成する結果を基に、これらを異なる要素形状で分割して展開図を設計する方法を議論し、これを応用して折りたたみ可能な異型の角筒及び角錐殻を作る方法を述べた。

異なる寸法で展開図をモデル化すると、図14(b)の例に見たように拘束式が極めて多くなり、同一模様で展開をつくるようには簡単ではない場合が多いことが判明した。本文では記述されていないが、例えば図8に示された矩形断面モデルや図12の4角錐モデルをらせん様式にすることは数理的に不可能であることが明らかになっている。創世期にある折りたたみ法を系統的に研究する観点から、このような折りたたみが出来ないことを示して行くことも、その限界を明らかにする点から究めて重要なことと思われる。

本報告では、直ぐにこれを工学的に利用するのは難しいと思われるモデルも含まれているが、このようなモデルの開発もまた、折りたたみ技術を体系化し、これをより洗練し、有用な折りたたみ形式の構造を開発して行くことに寄与するものと考えられる。またこれらのモデルの折り線をトラス部材とみなすと、折りたたみ式のトラス構造の基本モデルにもなるとともに、新しい機構要素の創製にも役立つものと思われる。

環境保全の点からプラスチック製品を紙製品で置き換えようとする動き、あるいは即席食品容器等を折りたたみ収納形式にする要求等に見られるように、上述した折りたたみ技術の集大成はこれらに答えるための時代の要請になりつつあると思われる。

7. まとめ

矩形あるいは六角形要素を構成する山折り線とこれらの要素を2分割する谷折り線でパターン化して異なる形状の要素群を用いて折りたたみ可能な円筒、角筒あるいは角錐殻を設計する方法を述べた。これらは折りたたみ技法の機能性を拡大し、かつ造形性を高め、この技法が工業製品や民製品に汎く用いられるような系統的な折りたたみ収納法を集成する際の基本モデルになるとと思われる。

参考文献

- (1) <http://spartans.gsfc.nasa.gov/missions/flown/207/207.html/207/207.html>
- (2) 野島, 日本機械学会論文集, 66-643, C(2000), 1050-56
- (3) 野島, 日本機械学会論文集, 66-647, C(2000), 2463-69
- (4) 野島, 日本機械学会論文集, 67-653, C(2001), 270-75
- (5) 野島, 日本機械学会論文集, 67-657, C(2000), 1669-74
- (6) 三浦, 日本機械学会誌, 90-828 (1987), 1394-1400

謝辞 本報告の一部は2001年度、文部科学省科学研究費の援助でなされた。記して謝意を表す。