

B09 シザーズを用いた宇宙展開構造物設計法に関する基礎的研究

高橋樹生（都市大院），内野翔太（都市大院），藤森祐陽（都市大院），
川口健一（東京大）宮坂明宏（都市大）

Tatsuki Takahashi (Tokyo City University Graduate School),
Shota Uchino (Tokyo City University Graduate School),
Yuhi Fujimori (Tokyo City University Graduate School),
Ken'ichi Kawaguchi (Tokyo University),
Akihiro Miyasaka (Tokyo City University)

The Scissors member is the universal type of member that can be applied for deployable structures with various geometries. High compactness with high storing efficiency in its folded configuration is one of the biggest advantage of scissors-type deployable structures. Another feature of the scissors-type deployable structure is its innate synchronism, by its single DOF, in motion. This study investigates a theoretical approach of how to assemble scissors-type deployable structures with various curved surfaces. Many of deployable structures, antennas and shelters, require curved surfaces, and thus a research of curved surface deployable structures is important. One of the solutions to improve the reliability is the improvement of the synchronized motion during deployment. Thus, we propose a deployable structure composed of scissors members. The structure having scissors members is usually simple and has excellent mechanical synchronization. If a proper design method related to the assembly of the scissors can be found, any parabolic structure can be constructed. In this paper, we investigate and propose a design method of parabolic surfaces using a scissors structure.

Key words: Deployable structure, Scissors structure, Parabola surface

1 緒言

1.1 背景

近年の宇宙開発では高度なミッションを行う科学衛星などにより，搭載されるアンテナの開口径の大型化や発電装置の大型化が進んでいる[1]．また，将来的に月や火星などの有人探査の際に活動拠点となる大型のシェルターが必要となる．これらの構造は様々な理由から曲面を要求されるが，立体剛性を活用するため曲面構造となる場合も多い．しかし，同時にこれらの構造を宇宙空間へ運ぶにはロケットのフェアリング内に収める必要があるため，収納効率が高く，かつ打ち上げ後に軌道上で所定の形状に組みあがる展開構造物が必要とされている[2]．

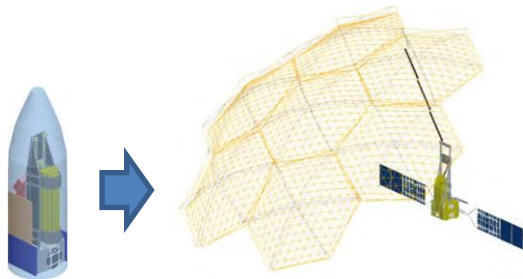


Fig.1.1.1 Image of Large Deployable Antenna

このような様々な形状の展開構造物のニーズに対し，

ミッション毎に異なるメカニズムを有する展開構造物の設計が行われることが多いが，一方で多くの形状に適用可能なユニバーサルな展開構造物用部材も存在する．シザーズ部材はそのような部材の一つである[3]．シザーズ部材を用いたシザーズ型展開構造物は，収納効率が高く，かつ出来上がった構造が1自由度系構造となり展開の同期性に優れるという利点がある．本研究ではシザーズ部材を用いて様々な曲面構造を形成する為の理論を整理する．

1.2 シザーズ部材

Fig.1.2.1 に示す部材とは，一對の棒状部材の交差した点を1自由度ピボットにより互いに平面的回転が自由となるように接合した展開構造物の一種である．構成される展開構造物は，複雑な機構を必要としないことや収納状態にある展開構造物の1モジュールに展開に必要な外力を与えると構造全体に応力が伝播することで構造全体の展開性が1自由度で同期されるのが利点である．

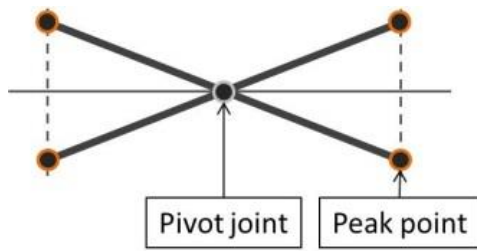


Fig.1.2.1 Scissors structure.

我々はシザーズ部材を，Fig.1.2.2~Fig.1.2.4 のように3種類に分けて考えている．レギュラーシザーズはシザーズの一般的な構成である．オフセットシザーズは交点を境に棒状部材に角度を与えた構成であり，ベンダブルシザーズはレギュラーシザーズと同様の構成でありながら部材の歪みを許容した構成である．レギュラーシザーズをFig.1に，交点に角度を与えたオフセットシザーズをFig.2に，また部材の曲げを許容したベンダブルシザーズをFig.3に示す．

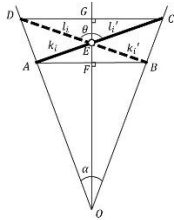


Fig.1.2.2 Regular Scissors

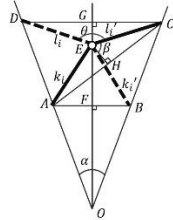


Fig.1.2.3 Offset Scissors

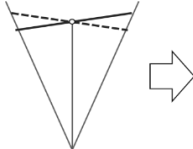


Fig.1.2.4 Bendable Scissors

Fig.1.2.2 に示すレギュラーシザーズにおける幾何学について次式の対称性

$$l_i = l_i' \quad (1.2.1)$$

$$k_i = k_i' \quad (1.2.2)$$

を仮定した場合，二つの部材からなる角度 θ と部材端点から伸びる焦点の角度 α の関係は次のようになる．

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)(l_i - k_i)}{(l_i + k_i)} \quad (1.2.3)$$

これより中心角 α は， θ に伴い変化することがわかる．一方，オフセットシザーズはシザーズの交点を境に部材に角度を与えた構成であり，交点がそれぞれの端点を結ぶ線からオフセットしたものである．Fig.1.2.3 において式(1.2.1)，(1.2.2)の対称性を仮定した場合，部材に与えられる角度 2β と焦点における角度 α の関係は常に

$$\alpha = \pi - 2\beta = \text{const.} \quad (1.2.4)$$

となる．オフセットシザーズは角度 θ の変化に関わらず常に角度 α が一定となるため，焦点 O に対する中心角を一定とした軌道の展開構造を構成することになる．

Fig.1.2.4 に示すベンダブルシザーズは，展開の途中で部材が変形することを許容する部材で，レギュラーシザーズとオフセットシザーズの両方の間を行き来することができると同時に，展開過程に曲げひずみエネルギーを持ち込む部材となる．

1.3 既往研究

本研究室において，江藤，山口等によって宇宙で用いられる曲面構造は回転曲面の性質を持ったものが多いという背景から，シザーズ部材によって回転曲面の近似が行われてきた．(Fig.1.3.1, Fig.1.3.2)

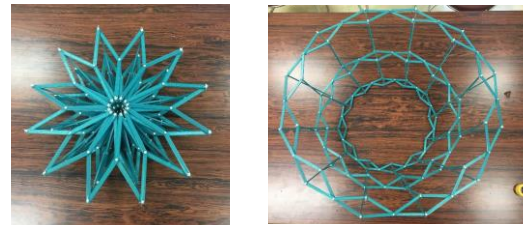


Fig.1.3.1 Designed by Two Scissors

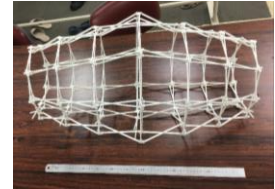


Fig.1.3.2 Designed by Regular Scissors

Fig.1.3.1 のモデルは，周方向にオフセットシザーズを用いることで，角度が一定のまま展開を行うので，無歪のモデルが作成できた．しかし，収納効率が低いというデメリットが挙げられた．次に，Fig.1.3.2 のモデルは，収納効率を考慮し，レギュラーシザーズのみで作成を行ったが，回転曲面としての完成形にいたるためには，両端をジョイントする必要がある．そして，四角形グリッドのみで構成されているため，剛性が低いという点が挙げられる．

また，F.Escrig[4] や C.Gantes [5]等によって，シザーズ



Fig.1.3.3 Gantes Dome

部材で三角形グリッドによるジオデシック球面を展開構造として成立させるドームモデルが提案されている。

(Fig.1.3.3)

本モデルは、三角形グリッドのみで構成されることで、Fig.1.3.1 や Fig.1.3.2 のような四角形グリッドのものより高い剛性が期待できる。また、レギュラーシザーズのみでの構成のため、直線状にまとまるため高い収納性もある。また、自由度が一つのため、展開の際に複雑な展開方法を取らないことが挙げられる。

2 ジオデシックパターンによる設計方法

2.1 設計するジオデシックパターン

既往研究で述べたように、Gantes Dome は幾何学的にも弱点が少ないことや収納効率が高いこと、そして、容易に収納展開が可能であることから、基本デザインを参考にし、設計を行う。

まず、Fig.2.1.1 にジオデシックパターンを平面に落とし込んだ図を示す。また、今回簡易化のため赤枠で囲った部分の設計を行った。

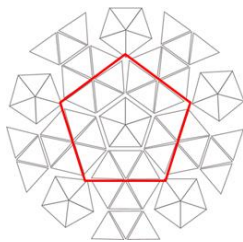


Fig.2.1.1 Geodesic Pattern

2.2 シザーズの基本条件の整理

次に、シザーズによる設計を行う前に、シザーズの基本の幾何学的な条件を整理する。Fig.2.2.1 に今回使用するレギュラーシザーズの簡易モデルを示す。また、 x_n は位置ベクトル、 a, b, c, d は部材長を表している。

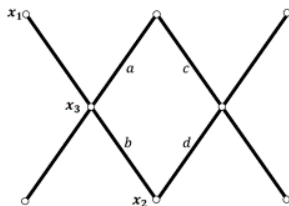


Fig.2.2.1 Regular Scissors Model

Fig.2.2.1 より、レギュラーシザーズの基本の幾何学的な条件は二つ挙げられる。まず、一つは棒状部材がまっすぐであることである。この条件については、位置ベクトル X_n を用いて、(2.2.1)式のように示すことができる。

$$X_3 - X_1 = k(X_2 - X_1) \quad (2.2.1)$$

ここで、 k は任意の定数を表す。

また、二つ目の条件としては、小さく収納されることが望ましいので、それぞれの部材長を用いて、(2.2.2)式のように示すことができる。

$$a + b = c + d \quad (2.2.2)$$

2.3 曲面設計方法

本章では、曲面の設計方法について述べる。既往研究や本研究室で行われてきた曲面の設計方法は限定的なものであると考える。今回の設計方法はある程度の設計の自由度を持たせることができるものを提案する。

まず、Fig.2.3.1 に提案するシザーズによる曲面の構成について示す。

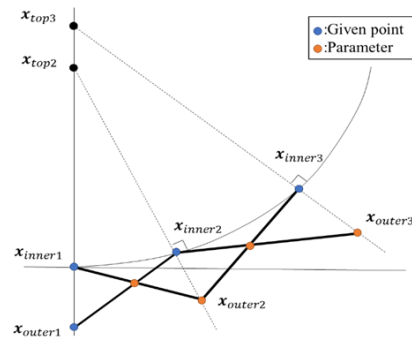


Fig.2.3.1 Design method of Curved Surface

ここで、シザーズの上端に位置する点を X_{inner} 、下端に位置する点を X_{outer} とおく。今回、曲面を設計する上で二つの条件が挙げられる。まず、一つ目は、 X_{inner} が与えられた曲面上 $f(x)$ に乗ることであり、(2.3.1)式のように示すことができる。

$$y_{inner} = f(x_{inner}) \quad (2.3.1)$$

今回は、 $f(x)$ をパラボラ曲面に設定するため、焦点距離を F とおくと、(2.3.1)式は(2.3.2)式のように書き換えることができる。

$$y_{inner} = \frac{x_{inner}^2}{4F} \quad (2.3.2)$$

次に、二つ目の条件は、対応する X_{outer} は、その曲面に対して垂直な位置にくるように設定をした。よって、二つ目の条件を満たすには、(2.2.3)式が成り立てばよい。

$$y_{\text{outer}} = -\frac{1}{f'(x_{\text{inner}})}(x_{\text{outer}} - x_{\text{inner}}) + f(x_{\text{inner}}) \quad (2.3.3)$$

2.4 設計結果

前章で述べた幾何学条件の(2.2.1),(2.2.2),(2.3.2),(2.3.3)式をそれぞれ拡張して形状を求めた。また、焦点距離を変えた Table2.4.1, Table2.4.2 の諸元で設計を行った結果を Fig.2.4.1, Fig.2.4.2 に示す。

Table 2.4.1 Design Condition

Focus Length	10m
Diameter	40m
Thickness	1m

Table 2.4.2 Design Condition

Focus Length	10000m
Diameter	40m
Thickness	1m



Fig.2.4.1 Desined Model (F=10m)



Fig.2.4.2 Desined Model (F=10000m)

3 解析結果

3.1 大変位解析結果 (F=10m の場合)

Fig.3.1.1 に Origami/ETS を用いて大変位解析を行った結果を示す。

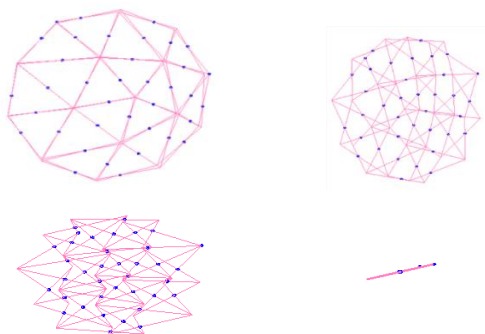


Fig. 3.1.1 Analysis Result (F=10m)

以上の結果より、今回提案された設計法によって作成されたモデルは、展開状態と期待された収納状態になることを確認し、展開から収納の過程においても期待した挙動を示しており、本研究の提案した設計法の妥当性を確認することができた。

3.2 大変位解析結果 (F=10000m の場合)

F=10m と同様に、Fig.3.2.1 に origami/ETS を用いて大変位解析を行った結果を示す。

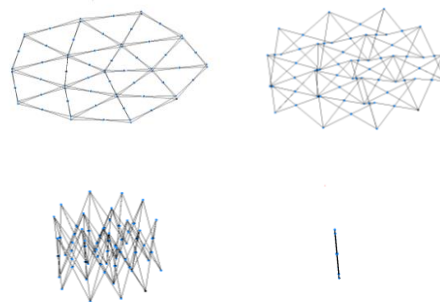


Fig. 3.2.1 Analysis Result (F=10000m)

Fig.3.1.2 より、Fig.3.1.1 と同じく設計した展開時から収納状態になることが確認できた。

4 結言

4.1 まとめ

・今回、パラボラ曲面の設計を行えたことで、提案した設計方法が非線形性のある曲面でも可能であることを示した。また、与える曲面の方程式を変えるだけで、様々な形状に適用できることを確認した。

4.2 今後の課題

・今回提案したモデルをジオデシックパターンを増やしたモデルについての検討。
・実験モデル作成のための、ヒンジ部を考慮した設計方法の再検討。

参考文献

- [1] 矢口依穂, 目黒在, 渡邊力夫: 薄板の面内剛性を利用した構造トポロジーと実用的展開構造物への適用に関する研究, 東京都大学修士論文, 2010
- [2] 特集 大型展開アンテナ - Space Japan Review, <http://satcom.jp/80/specialreport1j.pdf>.
- [3] Kelvin Roovers, Lara Alegria Mira, Niels De Temmerman, "From mathematics to membrane structures: translating architectural surfaces into deployable scissor grids", TENSINET SYMPOSIUM 2013 ,pp.213-223
- [4] F.Escrig et al. Design on Expandable Spherical Grids, Proc. Of IASS, Madrid, Vol.4, 1989.
- [5] C.J.Gantes : A Design Methodology for Deployable Structures, MIT for ph.D.,1991.