

シザーズ型展開構造物の単層ラチスドームへの適用に関する研究

Application of Scissors Type Deployable System to Single-layer Latticed Dome

近藤 慎輔*・川口 健一*

Shinsuke KONDO and Ken'ichi KAWAGUCHI

1. はじめに

展開構造物とは、輸送あるいは収納を目的に小さく折り畳んだ状態から大きく展開して利用する構造物の総称である。回転自由なジョイントやスライドするメカニズムなど構造内部に何らかの可動部分を持ち形態が変化するため、形態可変構造物ということもできる。

本報では、シザーズ型展開システムを単層ラチスドームに適用することを目的に設計した試作モデルの製作、さらに、この試作モデルの展開状態での線形解析結果について報告する。

2. シザーズ型展開構造物の調査

シザーズ型展開構造物とは、2本の部材をピボットと呼ばれる回転自由なジョイントで接続した、いわゆるシザーズ部材を構成要素とする展開構造物である。展開収納が可能であるためには以下の関係式が成り立つ必要がある。

ここに、 a_i , b_i , c_{i+1} , d_{i+1} はシザーズを構成する部材の各部分の長さである。(図1参照)

シザーズ型展開構造物の父である E. P. Piñero の特許¹⁾では、3本または4本1組のシザーズ部材を構成単位としており、展開状態で固定するためにケーブルなどの付加的な固定手段が必要であった。

収納状態から展開状態へと徐々に形態が変化する展開構造物にとって展開状態での固定方法は重要な問題となる。2本1組のシザーズ部材を用いた展開式ドームでは、展開時に付加的な固定を必要としないシステムが提案されており、以下にそれを示す。

2.1 T. R. Zeigler "Collapsible Self-supporting Structure"²⁾

レベル4のジオデシックグリッド状にシザーズ部材を配置した展開式ドーム構造である(図3)。下側の節点で接続される部材が、展開状態で同一平面上に位置するように、各節点位置を設定している。付加的な固定無しで安定する

*東京大学生産技術研究所 第5部

が、展開条件を満たさない部分があり、展開状態で余分な応力が働くなどの問題点がある。

2.2 F. Escrig "Design of Expandable Spherical Grids"³⁾

ジオデシックグリッド以外にアクシスメトリックグリッドも利用して、展開状態でピボット部分が球面上に位置するように設定している。角度 α_i は用いるグリッドによって決まっており、角度 β_i , δ , γ を調節することで部材長さを決定しているが(図5参照)、この場合も展開条件が完全には成立していない。

2.3 C. Gantes "A Design Methodology for Deployable Structures"⁴⁾

展開収納過程で幾何学的な関係によりシザーズ部材が弾性座屈を経過する(snap-through現象)ために、展開後は固定無しで安定することを説明している。幾何学的条件を定式化しており、Zeigler, Escrigの提案に比べ一般性のある設計を可能にしている。展開式ドームだけでなく、様々な平面・曲面構造を提案しているが、いずれもsnap-through現象を生じる多角形ユニットの組み合わせで構成されている。

ここに示したシザーズ型展開構造物の多くはパイプ部材によって構成されており、ジョイント部材も含めて、部材形状に関しては必ずしも実際の構造物に適しているとは言えない。

3. 単層ラチスドームへの適用

パイプ部材によるシザーズ部材は展開状態で2本の部材が完全には重ならず、構造全体が2層構造となる。これに対し、チャンネル部材を用いて、展開状態で1本のH型部材と同じ断面形状となるシザーズ部材(図8)を考えることができる。この場合、最終形状において2本の部材があたかも1本の梁材のように働くことが期待できる。従って建築屋根構造になじみのよい単層ラチス構造を構成することも可能である。このシザーズ部材を用いて単層ラチスの試作モデル(図9)を設計製作した。ピボット、ヒンジは回転自由なボルト接続とした。

展開状態・展開収納過程・収納状態で形態が変化するとともに、部材相互の位置関係も変化するため、各状態での部材

研 究 速 報

相互の位置関係を確認し、接触等が起こらず展開収納が可能となるように各部材を設計する必要がある。(図10)

また、展開収納を容易にする(展開性能の向上)ために、展開収納過程で幾何学的な関係によって部材に応力が働かないよう考慮した。これにより、どの形状においても架構が1自由度の伸び無し変形を持ち、展開時の固定方法が問題になると考えられるが、試作モデルでは、上下のジョイントを接続することで展開状態での固定が行えるように設計した。(図12)モデルは平面2方向グリッド、平面3方向グリッド、曲面2方向グリッド、曲面3方向グリッドの4種類を作成した。

平面構造モデルは、2方向グリッド・3方向グリッドともに、同一のチャンネル部材で構成した。2方向グリッドモデルの方がジョイント部材を小さくすることができ収納効率が高いが、展開状態での剛性は3方向グリッドモデルの方が高い。

2方向グリッド曲面構造モデルでは、ボルト穴の位置によって構造全体の曲率を調節し、切り欠き形状も平面構造と異なり、部材に対して直角とはならない。また、支持部分のジョイント部材が展開時に水平面に対し傾いた状態となるため、支持部分の固定方法が問題となる。展開収納過程においてジョイントで接続するシザーズ部材相互の角度も変化し、収納状態と展開状態での角度が異なるため、ジョイント部材について厳密には、2方向の回転自由度が要求されることが分かった。ただし、面内の回転量は微少なため、ある程度の回転はガタと部材弾性変形で吸収できる。

3方向曲面構造モデルでは、2方向グリッド曲面構造で問題となった展開状態における支持部分の固定方法を考慮

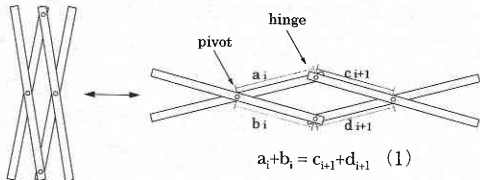


図1 シザーズ型展開構造の構成要素(シザーズ部材)

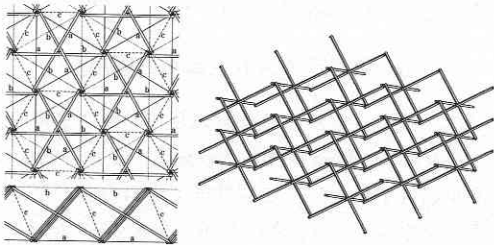


図2 E. P. Pinero "Three Dimensional Reticular Structure", 1965

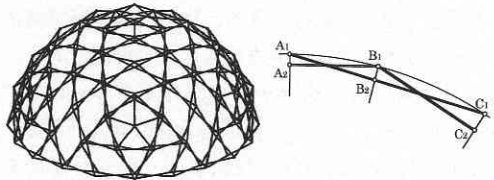


図3 T. R. Zeigler "Collapsible Self-supporting Structure", 1976

して、ジョイント部材が展開収納過程で水平となるように試作モデルを製作した。これにより、展開性能の向上も期待できるが、接続されるシザーズ部材の中心軸が一点で交わらず展開時における構造全体の強度低下が考えられる。

展開収納過程において中央六角形の対角線部分に生じる幾何学的不適合には、ルーズホールを設けることで対処した(図14)。ルーズホールによる接続部分は、展開後に固定する必要がある。このルーズホールを設けたチャンネル部材を取り除いても、展開収納過程に変化のないことが分かった。

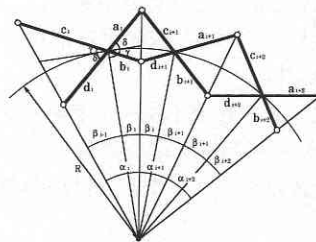
周辺斜材部分のシザーズ部材は、収納時に周辺ジョイント部材間の距離が長くなるため、上下どちらか片方しか接続できず(図15)、この部分も展開後の固定が必要である。

4. アルミ部材による単層ラチスドームの試作

既製のアルミニウムチャンネル部材(30×15, t=2)を用いて単層ラチスドーム(対角スパン204 cm ライズ26.4 cm)の試作モデルを製作した。

展開状態で仮締めした状態で全体の寸法を計測した結果対角スパン205 cm ライズ25 cmであった。支持部が全体で1 cm 広がり、頂点部分が1.4 cm 下がったことになる。

部材の自重下で周辺ローラー支持の解析結果では、支持部の広がりが0.004 cm、頂点部分の沈み込みが0.015 cmであった。従って、設計寸法との差は接続部分のガタによるものと考えられる。実建物ではジョイント部分のガタによる変形を考慮して設計する必要がある。



$$a_i = c_{i+1} = R \sin \beta_i / \cos(\delta + \beta_i) \quad (2)$$

$$b_i = d_{i+1} = R \sin \beta_i / \cos(\gamma - \beta_i) \quad (3)$$

図4 展開状態での節点位置関係

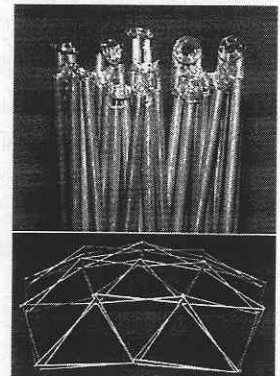


図5 模型製作による展開性能確認

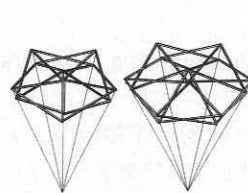


図6 正五角形と正六角形のユニット

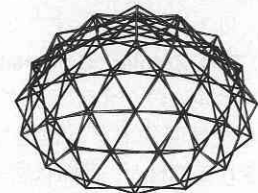


図7 ユニットで構成されるドーム構造

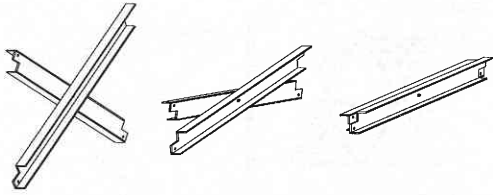
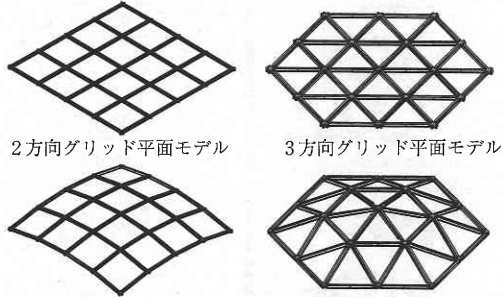


図 8 チャンネル型断面部材によるシザーズ部材



2方向グリッド平面モデル 3方向グリッド平面モデル
2方向グリッド曲面モデル 3方向グリッド曲面モデル
図 9 4種類の試作モデル

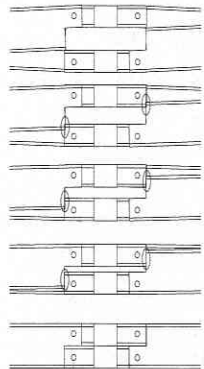


図 10 展開過程の挙動の検討

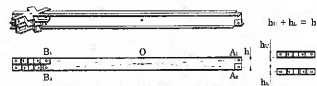


図 11 チャンネル部材とジョイント部材の接続部分

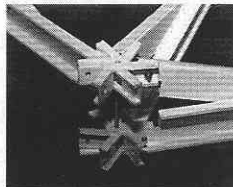


図 12 上下ジョイント部材の接続部分

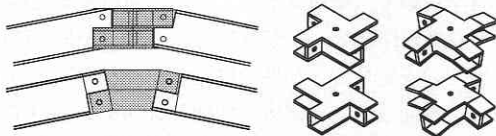


図 13 2方向グリッド曲面構造(チャンネル部材・ジョイント部材)の形状の検討

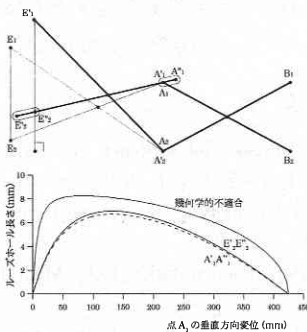


図 14 ルーズホールの大きさの検討

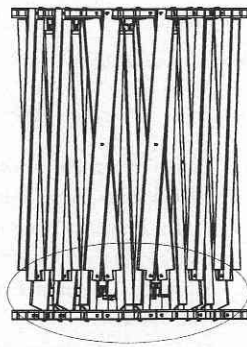


図 15 収納時の接続解除

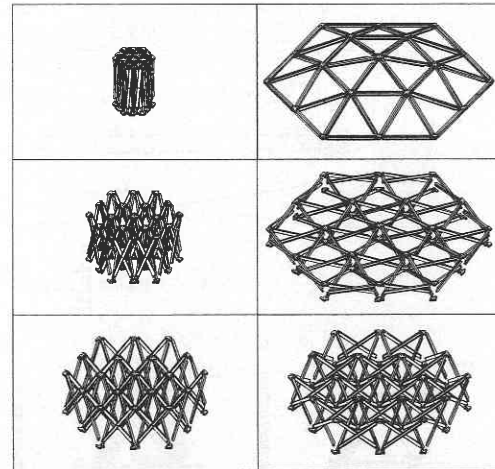
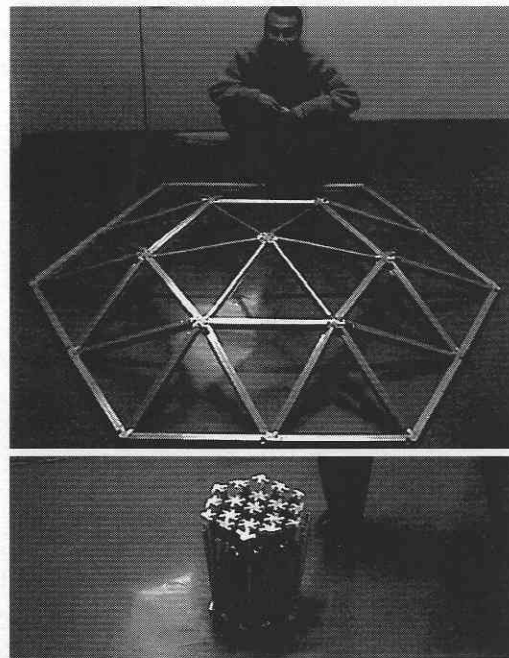
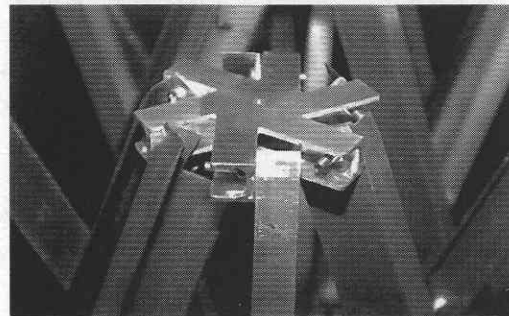


図 16 3方向曲面構造モデルの展開収納過程



展開状態(上)と収納状態(下)



接続部分(チャンネル部材の切り欠き部分, ジョイント部材)の詳細

図 17 アルミ部材による単層ラチスドームの試作モデル

表1 解析諸元

| ヤング係数 | ポアソン比 | 分布荷重 | ライズ | スパン |
|---|-------|-------------------------------|--------------|-------------|
| 7.0×10^9 (kgf/cm ²) | 0.36 | 3.1×10^3 (kgf/cm) | 26.4 (cm) | 204 (cm) |

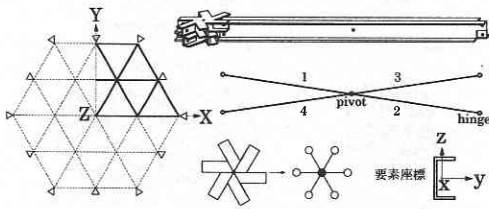


図18 解析モデル

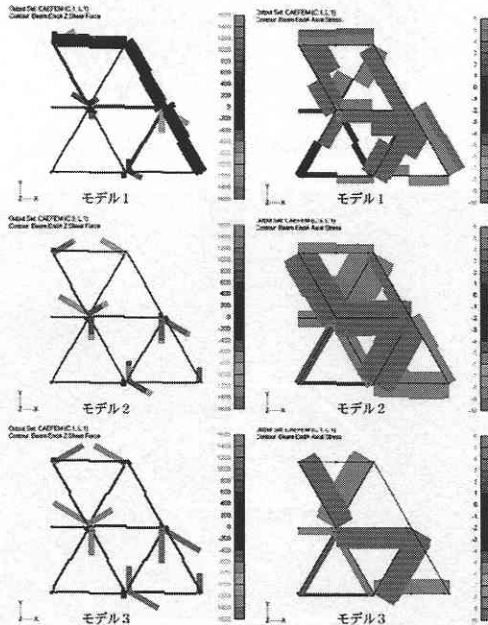


図19 剪断応用

図20 軸応力度

5. 解析結果

3方向グリッド曲面構造の試作モデルについて、汎用構造解析ソフトにより展開状態における線形解析を行い、単層ラチスドームへの適用性を検討した。荷重は全面等分布荷重のみを考慮した。解析モデルは対称性から全体の1/4とした。解析諸元を表1に示す。

比較対象として、断面積がチャンネル部材のちょうど2倍となる1本のH型断面部材で、2本1組のシザーズ部材を置き換えたモデルについても解析を行った。

拘束条件を含めて解析モデルを以下に示す。

- ・モデル1：チャンネルシザーズ部材，周辺ピン支持
- ・モデル2：モデル1+周辺上下ジョイント部材を一体化
- ・モデル3：H型部材，周辺ピン支持

以下に解析結果を示す。

ジョイント部で梁部材の軸線が一致しないので、ジョイント部分で剪断応力，曲げモーメントが極端に大きくなっ

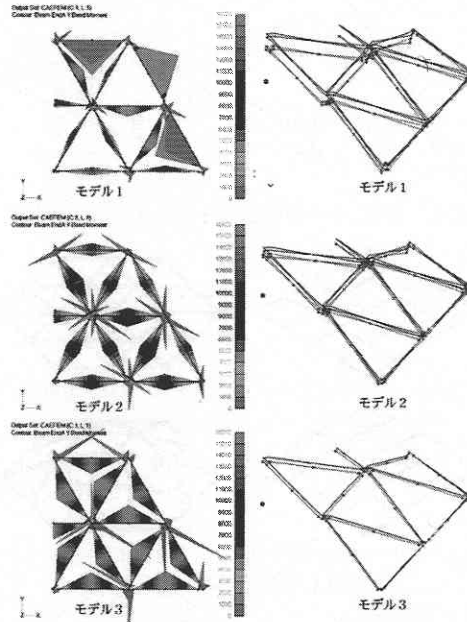


図21 曲げモーメント (y軸まわり) 図22 変位

ていることが分かる。従ってジョイント部材はチャンネル部材に比べ高い剛性及び強度が求められる。モデル2と3の比較より、剪断応力，曲げモーメント，軸応力度ともに、シザーズ部材モデルの周辺上下ジョイントを一体化することで、1本のH型部材とほぼ同じ傾向を示すことが分かる。変形はシザーズ部材モデルの方が大きく、モデル1, 2はモデル3のそれぞれ約3倍, 1.5倍となっている。

6. 結論

これまでに提案された展開構造物を調査し、チャンネル型断面部材を用いて、単層ラチスドームに適用するための試作モデルを設計製作した。3方向グリッド曲面構造モデルでは、展開状態での安定性および展開性能の高い試作モデルを製作できたが、展開後の固定箇所増加および中心軸のずれによる強度低下については今後検討する必要がある。数値解析では、ジョイントの強度が問題となることが確認できた。また、変位の解析にはジョイント部分のガタの効果も考慮する必要があることが分かった。(2000年2月10日受理)

参考文献

- 1) Emilio Perez Pinero: Three Dimensional Reticular Structure, United States Patent 3,185,164, 1965.
- 2) T. R. Zeigler: Collapsible Self-supporting Structures, United States Patent 3,968,808, 1976.
- 3) F. Escrig: Design of Expandable Spherical Grids, IASS Madrid Vol. 4, 1989.
- 4) C. Gantes: A Design Methodology for Deployable Structures, Massachusetts Institute of Technology for Ph.D., 1991.