ループ状開閉式ドームの構造･構法システム

正会員　粉川　牧

1．はじめに

頂部に円形天窓（オクルス）を有しその直径の大きさ及び全体の幾何学的形状を連続的に変化させることが可能な開閉式ドームは、（1）天窓を開閉することによって、天候の変化に対応し、内部の採光状態を調整し、あるいは内部の換気を行うことができる、即ち、環境設備合理性、（2）周辺に折り畳んだ状態で組み立てた後、駆動して構造躯体を完成できる、即ち、施工合理性、（3）連続的な幾何学的形状変化によって、ドーム内外の景観をダイナミックに演出できる、即ち、造形・芸術性、といった数々の建築上の特長を備えている。しかし、この新しいタイプの開閉式ドーム（以下「ループ状開閉式ドーム」と称す。）は構造・構法技術的に未解決の問題が残されており、建築構造物として未だ実現していない。

本研究は、「ループ状開閉式ドーム」の合理的な構造･構法システムを提案・開発しようとするもので、本報告では、そのシステムの概要を示す。

2．既往のアイデア

ループ状開閉式ドームの構造体を構成する要素について次の二つのアイデアがよく知られている。一つはC.Hoberman によって考案された「Iris Dome」で、偏心はさみ要素 (Angulated Element)の巧妙な形状変化特性に立脚して導かれたこのアイデアはループ状開閉式ドームの存在を初めて視覚的イメージを持って明瞭に提示した極めて先駆的なものである[1),2)]。他の一つは、Z.You & S.Pellegrino によるもので、平面上で自由にその形状変化が可能な平行四辺形要素を含む一般化された２次元多折はさみ要素（Generalised Multi-Angulated Element）群を曲面上に平行投影して任意形状のループ状開閉式ドームを得るという極めて興味深いアイデアを提案している[3),4)]。形状変化の幾何学的条件を理論的に満足するこれら二つのアイデアは、しかしながら、実構造物への適用を考えると、力学的条件に関していくつかの解決困難な問題点を含んでいると思われる。例えば、前者では理論上、各偏心はさみ要素は面内でピン接合されねばならず、その様な接合部を製作することは難しく強度的にも問題があると思われる。一方、後者では、はさみピン交点の回転軸がドーム底面と垂直でなければならないという理論上の制約がある為、特にドーム曲面の傾斜が急な場合に、その交点に加工上及び強度上の問題が生じると思われる。このような状況の中、筆者はこれらの問題点を解決する３次元多折はさみ要素の幾何学的形状を発見し、これが本研究に着手する契機となった。

3．３次元多折はさみ要素の幾何学

3．1　はさみピン交点の配置方法

本アイデアに於ける３次元多折はさみ要素は、球面を平面で切断することによってその幾何学的形状が決定される。このとき、はさみピン交点の回転軸はドーム曲面の法線方向にほぼ一致し、部材間の応力伝達はスムーズとなり、接合部も加工が容易で強度的にも優れているという特長を有する。図１に示すように、ドームの基準形状を構成する部分球面Ｓの上に、３次元多折はさみ要素のピン交点（１、２、・・、ｉ、(ｉ＋1)，・・，ｎ）を次のように配置する。

（イ）部分球面Ｓを、部分球面Ｓの頂点Ｔを通り中心軸Ｚに対して斜めに交差する平面Ｐで切断する。

（ロ）各はさみピン交点を、部分球面Ｓと平面Ｐとが交差する部分に形成される円Ｑ（図１（b）の伏図では楕円として現れる）の上に、周方向に順次、ｘｙ平面上において等角度で配置する。即ち、図１（b）に於いて、

$$\theta_{12}=\theta_{23}=\cdot\cdot\theta_{i(i+1)}=\cdot\cdot\cdot\theta_{(n-1)n}$$

この方法によってその幾何形状が決定された３次元多折はさみ要素群は、ドーム曲面上を剛体移動できることを以下の命題を解くことにより証明する。

3．2　命題

図２に示すように、円Ｏの円周上に異なる２点Ｔ，Ａがある。線分ＯＡの端点Ｏが円Ｔの円周上を、他の端点Ａが直線ＴＡ上を動く時、それぞれの動点を点Ｏ'、Ａ'とする。この時、直線ＯＡと直線Ｏ'Ａ' の成す角は点Ａの位置によらず∠ＯＴＯ' に等しい。

3．3　証明

上記命題を証明するには、∠ＯＴＯ'＝ｔ，∠ＯＴＡ＝ａ、ＯＡ＝Ｏ'Ａ'＝ＯＴ＝Ｏ'Ｔ　として、∠Ａ'ＭＡ＝∠ＯＴＯ'＝ｔ　であることを示せばよい。

∠ＯＡＴ＝∠ＯＴＡ＝ａ（∵△ＯＡＴは２等辺３角形)、∠Ｏ'Ａ'Ａ＝∠Ｏ'ＴＡ=a-t（∵△Ｏ'Ａ'Ｔは２等辺３角形），　従って、∠Ａ'ＭＡ＝∠ＯＡＴ－∠Ｏ'Ａ'Ａ＝

Structural System of Retractable Loop-Dome

KOKAWA Tsutomu

a－（a－t）＝t

結局、直線ＯＡと直線O' A' の成す角は点Aの位置（ここでは角度a で表されている）によらず、∠ＯＴＯ'（点Ｔまわりの回転角度ｔ）のみに依存する。この命題の証明から次の定理が導ける。

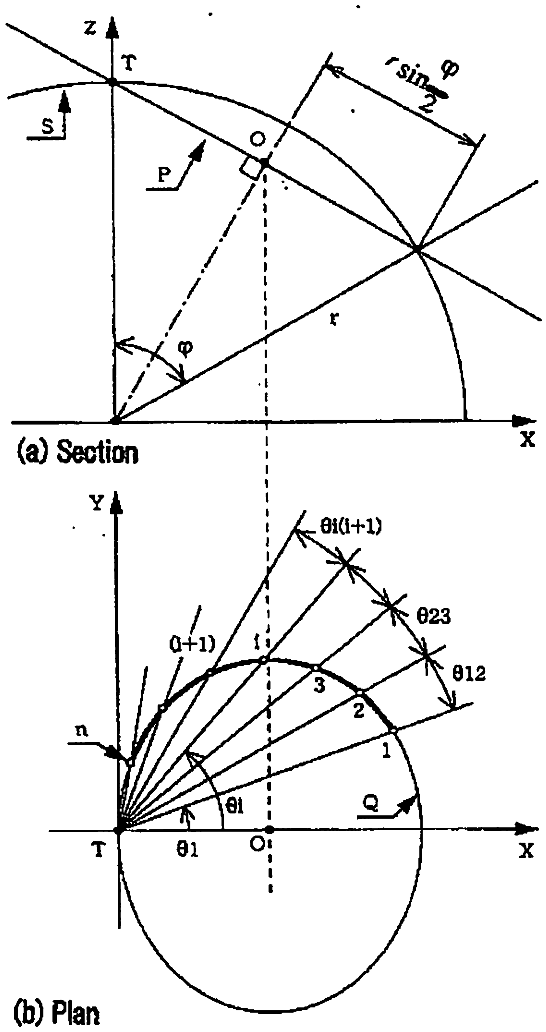

図１　はさみピン交点の配置決定法

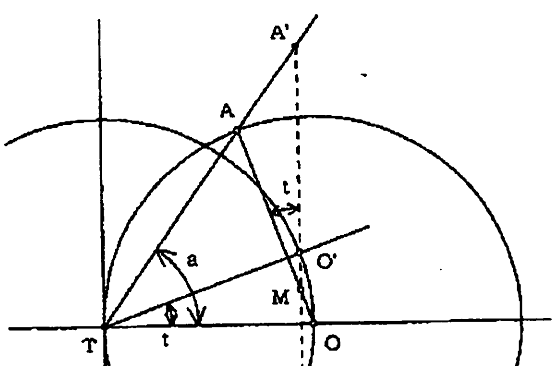

図２　命題（説明図）

３．４　定理

円Ｏの円周上に異なる点Ｔ，Ａ，Ｂ，Ｃが図３のように位置しているとする。円弧ＡＢの端点Ａ，Ｂがそれぞれ直線ＴＡ，ＴＢ上の点A'，B' に移動したとき、円弧ＡＢ上の任意点Ｃは直線ＴＣ上の点C' に移動し、且つ円弧A' B' の中心点O' は円Ｔの円周上にある。即ち、円弧ＡＢを点Ｏから点O' 迄平行移動し、さらに、その中心点O' に関して∠ＯＴＯ'（＝ｔ）だけ回転したとき、円弧ＡＢ上の任意点Ｃは、点Ｃと点Ｔを結ぶ直線ＴＣ上に移動する。 図１に示されているように、本アイデアによる３次元多折はさみ部材のはさみピン交点の位置は、その基準形状において、円Ｑ上の点（１、２、・・、ｉ、（ｉ＋１），・・，ｎ）にあるとしている。頂点Ｔからこれらの点を結ぶそれぞれの直線上を各点が移動するとき、上記定理によって、この３次元多折はさみ要素はその要素形状を変化させることなく、即ち、要素変形を伴わずに剛体移動することが可能となる。

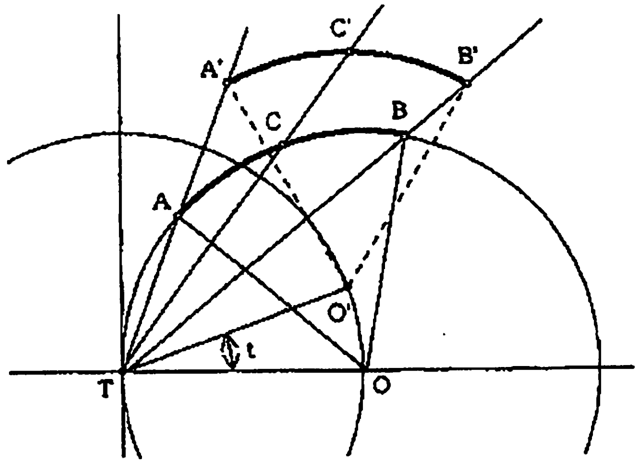

図３　定理（説明図）

４．３次元多折はさみ要素のラメラ配置

３で提示された３次元多折はさみ要素群を、図１の球面Ｓ上にラメラ配置し、且つ全てのはさみ交点のピン回転軸を球面Ｓの法線方向（即ち、球の中心方向）に一致させると、オクルス直径の大きさを自由に調整できるループ状開閉式ドームの骨組構造体が得られる。この時の形状を前述した様に「基準形状」、その状態を「基準状態」と名付けると、「基準状態」は図３においてｔ＝０の状態に対応している。開閉中、各交点は部分球面Ｓと異なる軸対称曲面上にあり、ピン回転軸と３次元多折はさみ部材側に設けられるピン用穴軸との間に微小な角度変化：ηが生じる。この角度変化：ηを吸収するために、部材側にルーズ・ホールを設けるか、あるいは、図４に示されるような自動調心ころ（or 玉）軸受等を埋め込むことが考えられる。

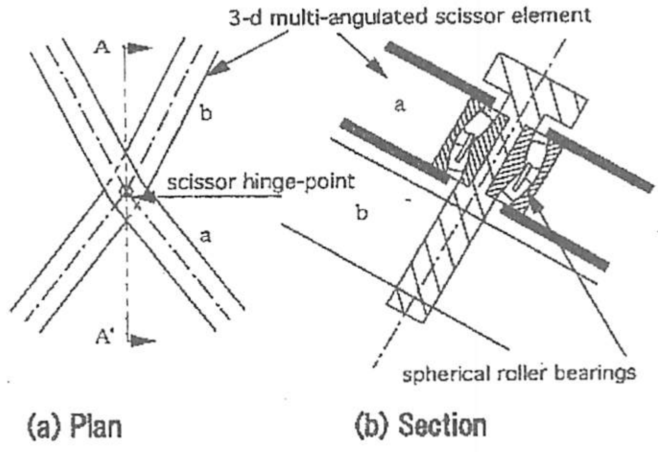

図4　はさみ交点のディテール・アイデア

5.　伸縮する内周・外周リングの設置

4で述べた骨組構造体が、安定を保ちつつその形状を連続的に変化させる構造体として実際に適用されるために工夫すべき点は、その現実的な駆動方法を考慮に入れつつ、いかに力学的合理性に富む構造システムを構築するかにある。そこで、図5に示される様に、内周と外周にそれぞれ伸縮する圧縮リング、引張リングを設けて、3次元多折はさみ部材が主に軸力伝達となるシェル的構造システムを提案する。それぞれのリングは一辺が直線状の伸縮ロッドから成る正多角形で近似されるものの、ここで問題となるのは、その伸縮ロッドの製作加工技術である。外周リングの場合、応力が引張で且つロッドの伸縮率も小さく、通常の電動(or 油圧)シリンダー技術で充分対応できるものと思われる。しかし、内周リングについては、応力が圧縮でしかもロッドの伸長率も大きく、その実現において技術的困難が予想される。ここでは、図6に示されるアイデアに基づく多重電動(or 油圧)シリンダー的なものを想定していると記述するに留める。

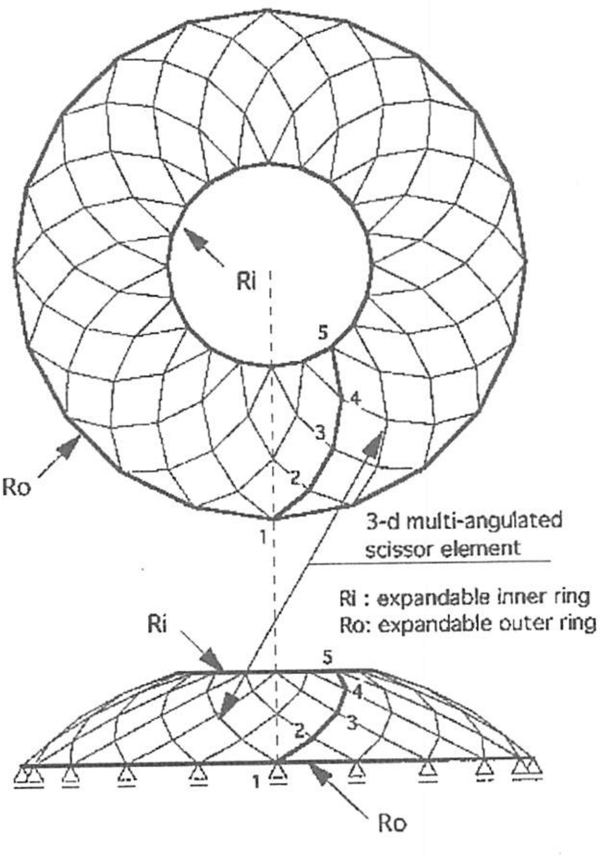

図5　シェル的構造システム

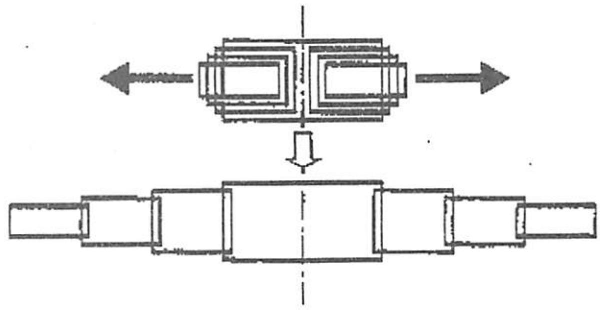

図6　伸縮ロッドのアイデア

6．形状変化シミュレーション

図5に示した構造体（上部構造体）と、その外周と円周基礎リングとの間の円錐台側面に配置されたトラス構造体を組み合わせると、新たなループ状開閉式ドームの構造モデルが創出される。ここで、トラス構造体は上部構造体と基礎リングにピン支持されている一種の可変機構を有している。なお、上部構造体における3次元多折はさみ部材の形状パラメータは図1において、$\varphi=60°$，$\theta_1=27°$，$\theta_5=72°$，$n=5$（3次元多折はさみ要素は4本の直線から構成される折線）とし、基準状態においてその外周直径は基礎リング直径と同じとする。つまり、$t=0$ で下部トラス構造体は垂直に立ち上がっているものとし、さらに、トラスの組立角度を $\xi=55°$ とし、$t=-0.275, 0, 0.275$ について、骨組構造体と屋根パネルの形状変化を図7に示す。ここで、各屋根パネルはV字型変断面を有し、中心から時計廻り方向の3次元多折はさみ部材上に沿って配置され、各はさみ交点上で支持されている。図7よりオクルス直径の大きさは著しく変化し、そして全体形状も変化に富む幾何学的空間造形を与えていることが理解される。従来のドームは一般的にお椀を伏せた様な形状で、比較的、静的な空間が形成されるが、本モデルでは前述の理由からドーム内外の景観をダイナミックに演出することができるものと思われる。

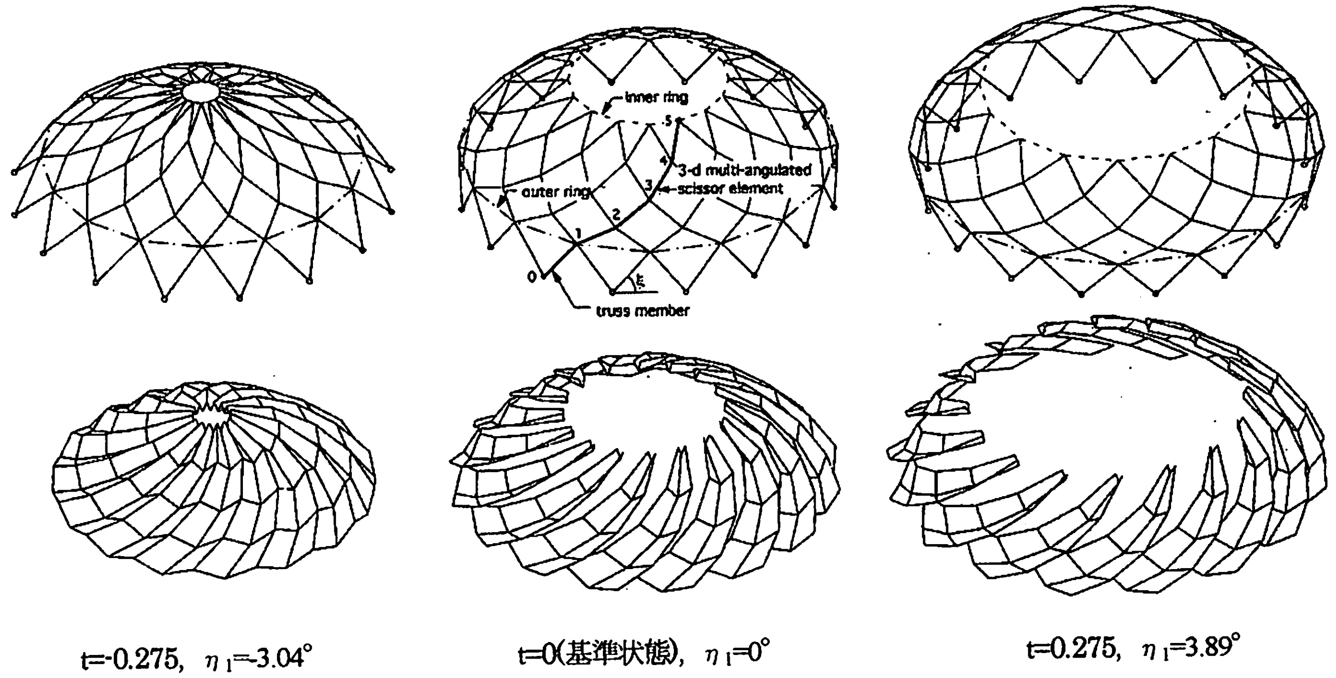

図７　フレームと屋根パネルの動き

７．おわりに

頂部に円形天窓（オクルス）を有しその直径の大きさ及び全体の幾何学的形状を連続的に変化させることが可能な開閉式ドームについて、その構造・構法システムに関わる基本アイデアを示した。即ち、（１）３次元多折はさみ要素の幾何学的形状の決定理論、（２）同３次元多折はさみ要素群のラメラ配置、（３）はさみ交点における角度回転を許す球（あるいはころ）軸受けの使用、（４）力学的合理性の高いシステムを構築する為、伸縮可能な内周・外周リングの設置、及び（５）はさみ交点上で支持されるＶ字型断面を有する屋根パネルの敷設の計５点について述べた。さらに、下部のトラス構造体を連結して得られた骨組構造体と屋根パネルに関する形状変化の数値シミュレーション結果を図示し、本ドームのダイナミックな視覚的イメージの一端を明らかにした。既に実施したスパン１０ｍアルミ製モデルの構法実験[5]、スパン１．５ｍの縮尺鋼製モデルの静的載荷実験および軸対称荷重下に於ける構造解析の諸結果の示すところによれば、内周リングが本ドームの力学的性能の向上に著しく寄与する。従って、伸縮率が大きな内周リングの「モノ化」は本ドーム開発の成否に深く関わっており、今後はその「モノ化」において、様々なアイデアが模索されねばならない。

謝辞

本研究の遂行に際し、(株) リゾート・マネジメント、(株) 高砂酒造および北海道東海大学教育研究基金より財政的援助を受けた。ここに感謝申し上げます。

［参考文献］

1)C.Hoberman, "RADIAL EXPANSION/RETRACTION TRUSS STRUCTURES",US Patent 5024031,1991
2)C.Hoberman, "The Art and Science of Folding Structures", SITE 24,pp.34-53,1992
3) Z.You and S.Pellegrino, "FOLDABLE BAR STRUCTURES", Int.J.Solids Structures Vol.34,No.15, pp.1825-1847,1997
4) S.Pellegrino, "DEPLOYABLE STRUCTURES", Current and Emerging Technologies of Shell and Spatial Structures, Proceedings of the IASS Colloquium (Madrid),pp.175-188,1997
5)T.Kokawa, "Structural Idea of Retractable Loop-Dome", Journal of IASS Vol.41(2000)n.2,111-116,2000

北海道東海大学芸術工学部建築学科教授・工博

e-mail: kokawa@da.htokai.ac.jp