

# 屈曲エアチューブの形態と屈曲部の復元力に関する考察

河端 昌也\*1  
森 みわ\*2  
村元 真吾\*3

## 梗 概

屈曲エアチューブは、長さ方向に実質的に制限のない円筒状のホースを屈曲させて、相互に結束することにより、多様な形態を形成可能である。本論文は、屈曲エアチューブの形態と屈曲部の復元力について検討している。オイラーグラフまたは準オイラーグラフである形態は一筆書きが可能のため、一本のエアチューブで全体架構を形成することができる。三角形以外の多角形を含む立体やドームを屈曲エアチューブで形成すると、インフレートおよびデフレートによる展開構造とすることも可能である。屈曲エアチューブの復元力は、屈曲部で相互に接触した膜面に作用する内圧力に起因しており、その大きさは内圧に比例し、屈曲部の角度に依存することを示している。

## 1. 序

空気を圧縮材に用いるエアチューブは極めて軽量で短時間の施工が可能であるが、外力による変形が大きくなると膜張力の消失によるリンクリング（皺）が生じ、さらに変形が進むと構造的に不安定になる場合がある。ゆえに風や雪などの支配荷重に対して、引張側では膜張力が許容応力以下にあること、圧縮側では張力状態を保持することが設計の基本要件となる。ただし空気圧による形状復元性は限界がなく、外力によって変形を生じて、外力がなくなれば元の形状に戻る。ゆえに構造上または機能上支障のない変形やリンクリングは許容することができる。はじめにエアチューブの構造と荷重抵抗システムおよび代表的な架構の例を表 1、図 1 に示す<sup>1)~4)</sup>。部材は円筒と円環、接合方法は結束、連結、結合に大別される。加圧方式は接合方法とも連動して、個別型、分散型、一体型のいずれかの方式となる。図 1 のように、エアチューブは単純な部材と接合方法の組み合わせによって、多様な形態を実現可能である。ここでエアチューブの剛性を整理すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} \text{軸剛性} & EA = 2\pi rEt \\ \text{曲げ剛性} & EI = \pi r^3 Et \\ \text{せん断剛性} & GA = 2(\pi G + p)rt \end{aligned} \quad (1)$$

ただし式中の記号はそれぞれ  $r$ : 半径、 $t$ : 膜厚、 $E$ : ヤング係数、 $G$ : せん断弾性係数、 $p$ : 内圧を表す。一般に膜は厚さ

1mm以下の非常に薄い材料であり、内圧を極端に高くしても直径が同じであればせん断以外の剛性は変化しないため、細長いエアチューブは外力に対して変形が大きくなりやすい。ゆえに軸力抵抗を期待してアーチや円筒形のエアチューブ構造を形成しても、外力による変形が進むにつれて曲げ応力が卓越する場合が多い<sup>5)~8)</sup>。曲げ応力は圧縮側のリンクリングに直結するため構造的に不利である。したがってエアチューブ構造はトラス架構または曲げ応力が卓越しないよう適切に補剛されたハイブリッド架構とするのが望ましい。図 1 中の B はエアチューブによる立体トラスの例であるが、このように接合部で各部材を一体化した立体骨組を、膜材料で製作することは容易でない。これに対して K、L は円筒を屈曲して相互に結束することによって製作の合理化を図っている。円筒状のチューブは実質的に長さの制約がなく、送水用や消防用ホースのように織布補強された強度、剛性の高い既製品も利用可能である。したがって屈曲エアチューブは簡便で効率のよい立体架構を形成できる可能性があるといえよう。

表 1 エアチューブの構造および荷重抵抗システム

部材	接合方法	架構形式	鉛直荷重時応力				例
			圧縮	引張	せん断	曲げ	
円筒 円環	結束 連結 結合	柱梁	○			○	A
		トラス	◎	◎			B
		校倉	○		◎		DK
		アーチ	○			○	E
		エアマット	○		○	○	CFGH
		ハイブリッド	◎			○	JHL

\*1 横浜国立大学大学院工学研究院 社会空間システム学専攻 准教授 博士 (工学)  
\*2 KEY ARCHITECT  
\*3 JFE エンジニアリング

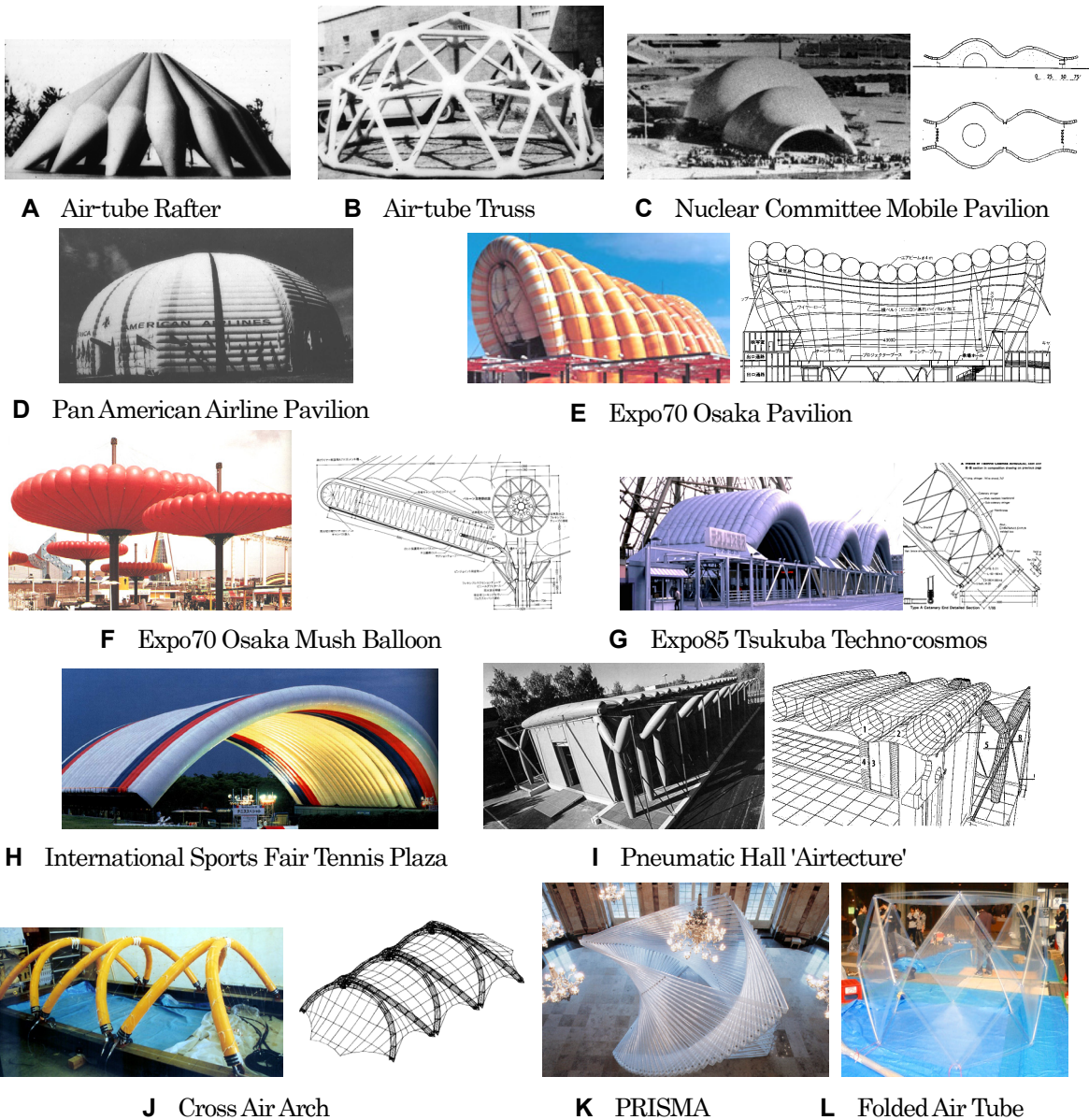


図1エアチューブ構造の例

## 2. 一筆書き可能な形状

一筆書きが可能な骨組は、全体をひとつながりにすることができるので、屈曲エアチューブに適した形態である。図形を節点 (node) と枝 (edge) の集合として捉え、そのつながり方に着目するグラフ理論によれば、「一筆書き可能な図形」は「準オイラーグラフ (semi-Eulerian graph) であること」と同値である。準オイラーグラフは図 2 (b),(c)のように全ての辺をちょうど1度だけたどる道が存在する図形をさす。(c)のように始点と終点を一致させられる図形はオイラーグラフ (Eulerian graph) と呼ばれる。準オイラーグラフの必要十分条件は、「次数が奇数である頂点が0または2つであること」である。次数とは節点に接続する枝の数のことで、次数が0の場合はオイラーグラフ、2の場合は準オイラーグラフとなる。平面上の図形は図 3のように節点の位置を調整すると容易に立体を形成できる。つまり屈曲エアチューブは、屈

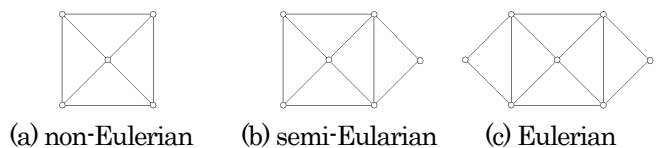


図 2 オイラーグラフの例

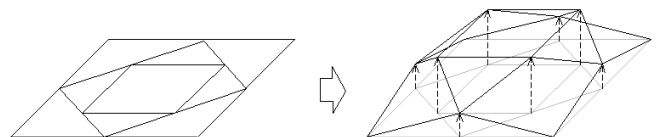


図 3 グラフ節点の座標移動

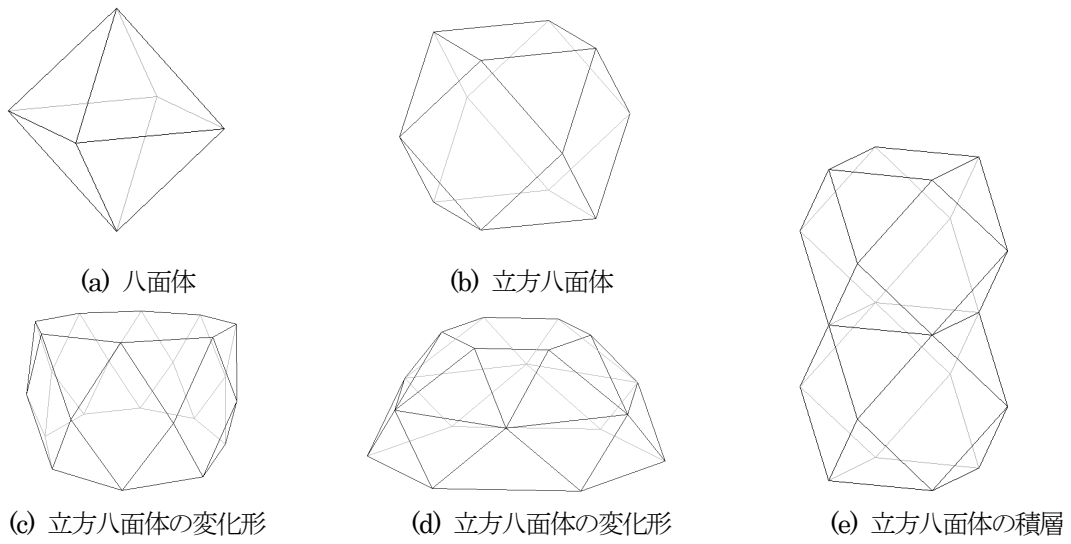


図 4 一筆書き可能な多面体

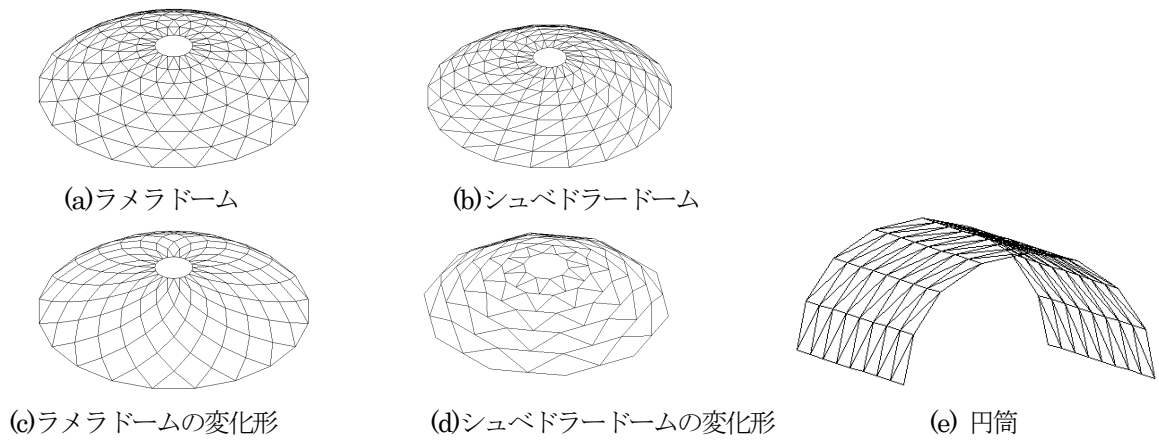


図 5 一筆書き可能なシェル

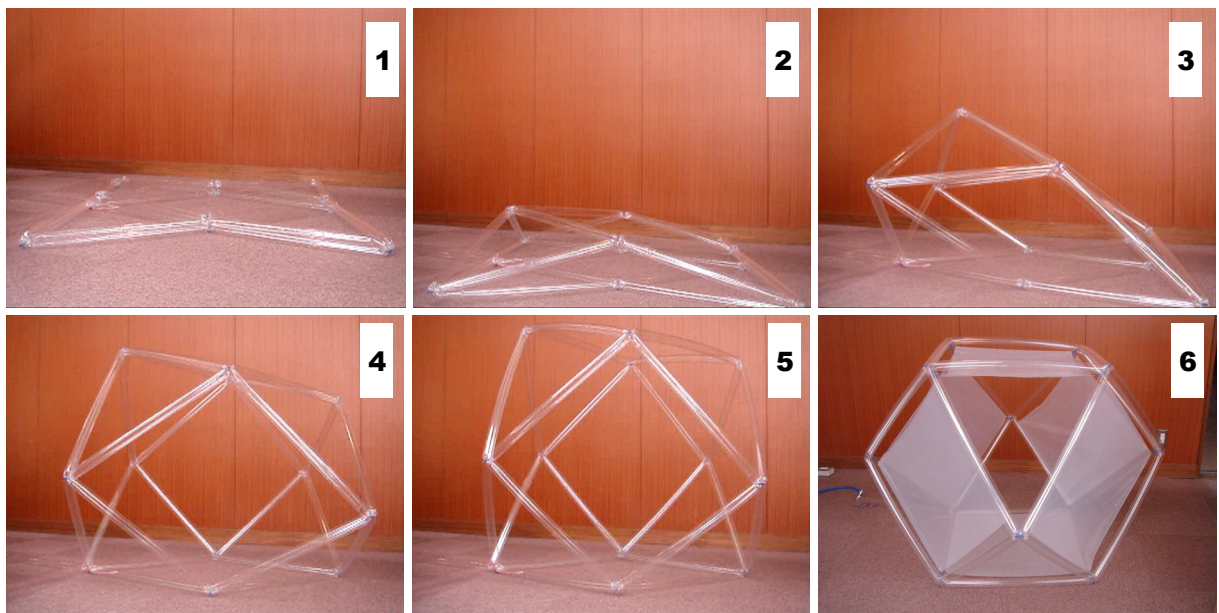


図 6 パンタグラフ機構によるエアチューブ展開構造

曲点の位置すなわち部材長さのコントロールにより様々な形状に対応可能である。またシングルレイヤーだけでなく、ダブルレイヤーなどの複層骨組も形成可能であり、一筆書きの制約を外せば形態の多様性はさらに拡大する。

オイラーグラフである多面体の例を図 4 に示す。八面体(a) や立方八面体(b)、立方八面体の上面と底面を多角形に変化させたもの(c)や、側面にタイバーを追加したもの(d)、立方八面体の積層(e)もオイラーグラフとなる。図 5 は、オイラーグラフである単層ラチスシュールの例を示している。球形ドームの網目パターンでよく用いられるラメラドーム(a)やシュベドラードーム(b)のほか、ラメラドームのフープ材を取り除いたタイプ(c)や、シュベドラードームの変化形(d)、円筒ラチスドーム(e)も一筆書き可能なオイラーグラフとなる。

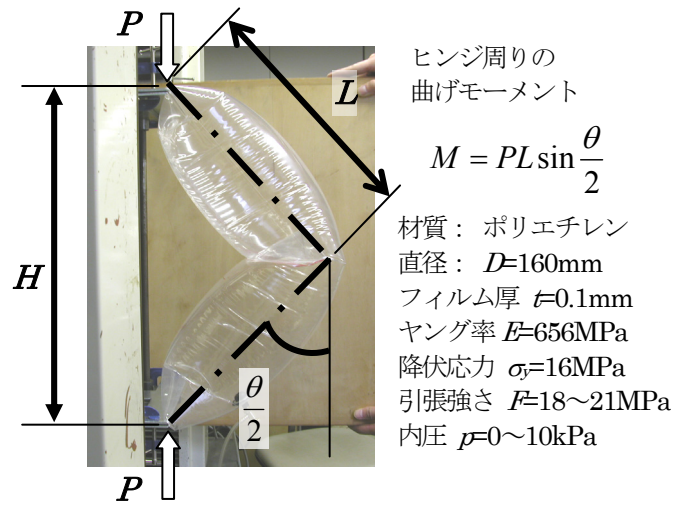


図 7 屈曲エアチューブのスラスト計測

表 2 試験体パラメータ

Case	L	$\theta$							
		20°	30°	60°	90°	105°	120°	135°	150°
Case-1	185mm	○	○	○	○	○	○	○	○
Case-2	300mm	△	△	△	○	○	○	○	○
Case-3	400mm	△	△	△	△	△	○	○	○

### 3. エアチューブによる展開構造

三角形以外の多角形を含む立体やドームは、面材などで角度変化を拘束して、構造的に安定させる必要がある。ただし、これらの部分の変形自由度を利用すると、インフレートおよびデフレートによるエアチューブ展開構造をつくることができる。図 6 は立方八面体のインフレート過程を示している。これはパンタグラフ構造になっているので、チューブを適切な角度で折り畳んで地上に設置すれば、空気圧によって安定的に全体が立ち上がっていく。所定の高さに達した後で、ステップ 6 のように面材を取り付ければ、構造全体の安定性が確保される。さらに、デフレート過程ではステップ 5 から 1 まで逆順で安定した状態で折り畳むことができる。屈曲エアチューブはこのような安定した展開構造としても可能性があると言える。

### 4. 屈曲エアチューブの復元力

屈曲エアチューブの内圧による復元力を定量化するために、図 7 のような実験を行った。支点長さ  $H$  を保持した状態で内圧を徐々に上げながらスラスト  $P$  を計測した。試験体パラメータは表 2 に示すように、チューブの腕の長さ  $L$  と回転角  $\theta$  である。図 8 は Case-1 のスラストと内圧の関係、図 9 は内圧  $10\text{kPa}$  の時のスラストと回転角の関係を示している。スラストは内圧にほぼ比例する一方で、腕の長さに対する依存性があり、回転角に対する変化は強い非線形性を示している。屈曲チューブは、折れ曲り箇所では膜が相互に接触しており、この部分に作用する内圧力が復元力の要因と予想される。そこで、屈曲部に生じるモーメントの算出を試みる。図 10 はその概要を示している。試験体に記録された接触部面積  $\Delta S$  とチューブ外縁に仮定した回転中心からの距離  $a$  の積の総和をモーメント  $M$  として式(2)により算出する。図 11 は屈曲部のモーメントと回転角の関係である。支点反力から求めた実験値と式(2)より求めた計算値は比較的近い結果となっている。スラストと同様に屈曲部のモーメントも回転角に対して強い非線形性を示している。したがって、屈曲部の復元力は圧縮側の接触した膜面に作用する内圧力に起因しており、同一の角度  $\theta$  では内圧に比例する。また角度の変化によって屈

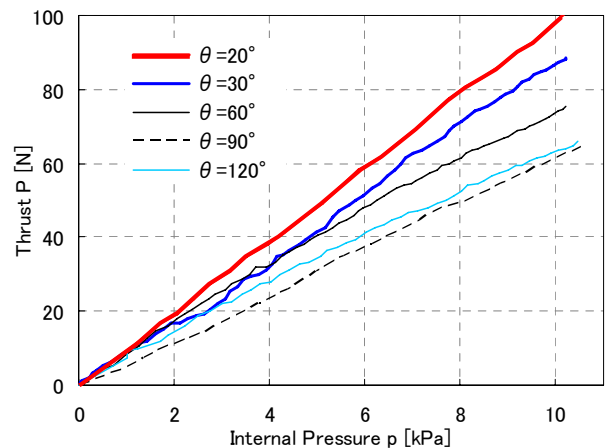


図 8 内圧とスラストの関係 Case-1

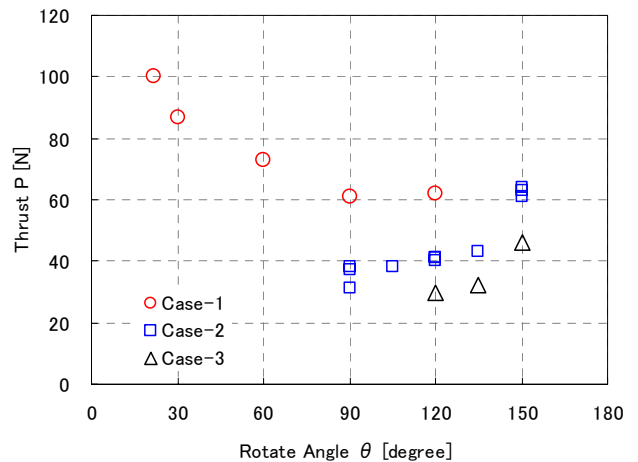


図 9 回転角とスラストの関係 (内圧  $10\text{kPa}$ )

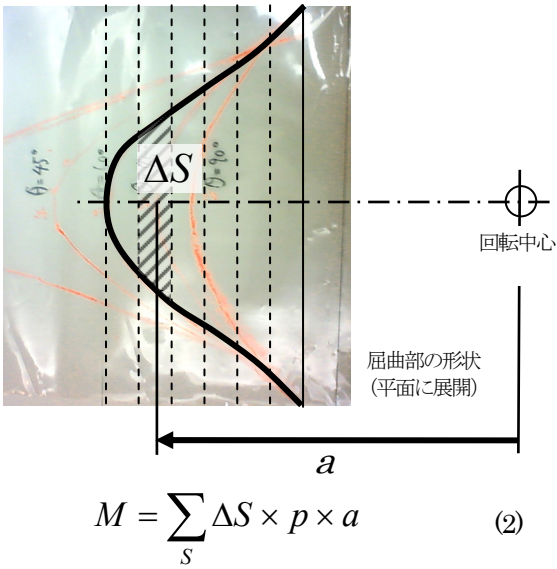
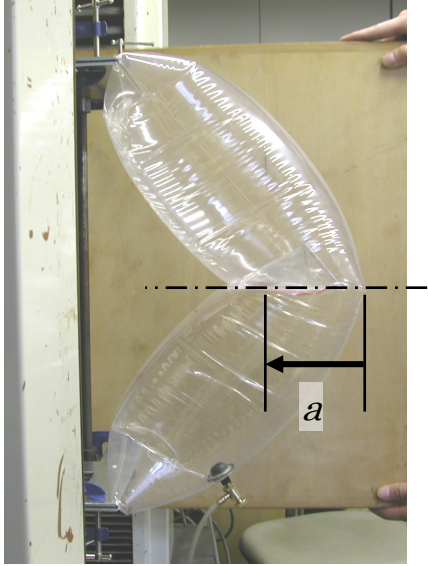


図10 屈曲部モーメントの計算

曲部の接触面積や回転中心からの距離が変化するため、 $\theta$  に対して復元力は非線形となる。

最後に、屈曲部の回転剛性を図12(a)のような回転バネによってモデル化することを試みる。これにより得られた回転剛性と回転角との関係を図13に示す。回転剛性は、回転角が大きくなるにつれて低下して、 $90^\circ$  から  $130^\circ$  付近で最少となる。 $130^\circ$  以上の深い角度では膜相互の接触面積が大きくなるため、回転剛性は再び増加する。支点長さ  $H=600\text{mm}$  のエアチューブの両端に図12(b)のようなモーメントを加えたとき、回転剛性は次式で得られる。

$$K' = \frac{M}{\theta'} = \frac{4EI}{H} = \frac{4\pi^3 Et}{H} = 706 \text{ Nm} \quad (3)$$

これを、図13で示した回転バネの剛性  $4\sim 10\text{Nm}$  と比較すると、屈曲部の回転剛性はエアチューブの曲げ剛性の  $0.6\sim 1.4\%$  程度のオーダーである。つまりエアチューブの屈曲は座屈後の大変形現象であり、その復元力はエアチューブの曲げ剛性に比べると極めて小さなものである。

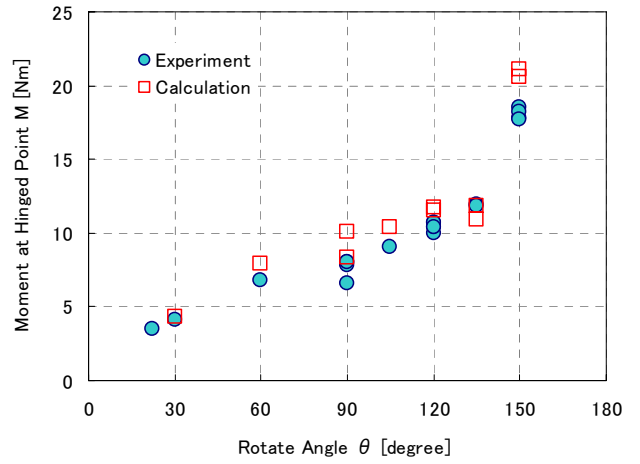
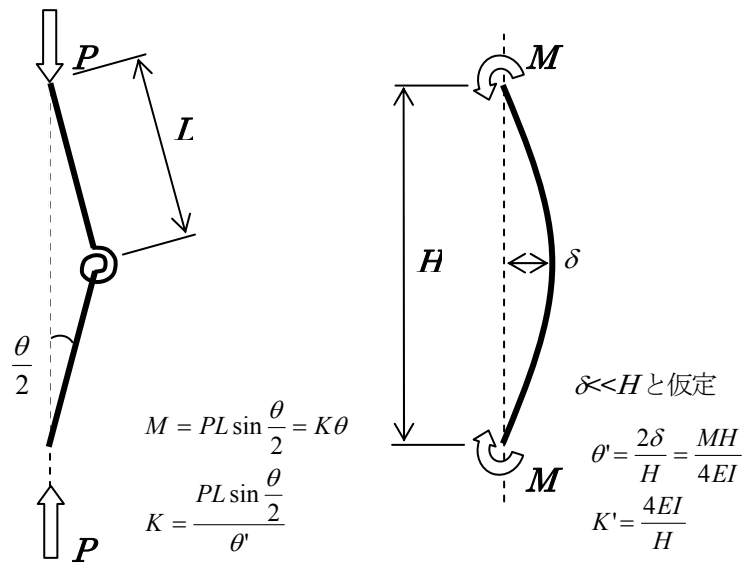


図11 回転角とヒンジ部モーメントの関係



(a) ヒンジを生じた部材の変形 (b) ヒンジのない部材の曲げ変形

図12 エアチューブ屈曲部の回転剛性のモデル化

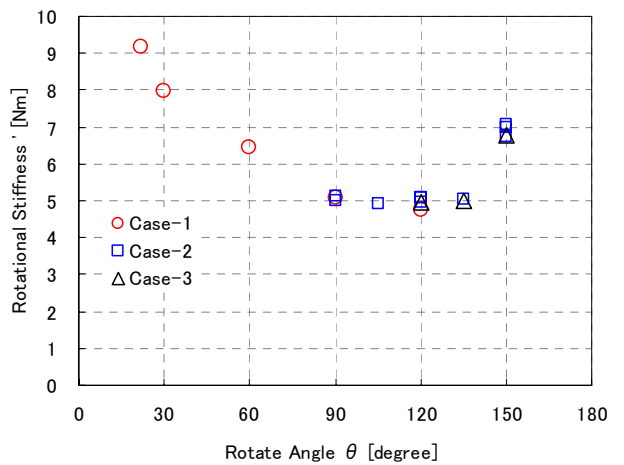


図13 回転角と回転剛性の関係

## 5. まとめ

本論文では、屈曲エアチューブの構造的可能性について検討した。以下に得られた知見を要約する。

- ・ 屈曲エアチューブは、長さ方向に実質的に制限のない円筒状のホースを屈曲させて、相互に結束することにより、多様な形態を形成可能である。
- ・ オイラーグラフまたは準オイラーグラフである形態は一筆書きが可能のため、一本のエアチューブで全体架構を形成することができる。
- ・ 三角形以外の多角形を含む立体やドームを屈曲エアチューブで形成すると、インフレートおよびデフレートによる展開構造とすることも可能である。
- ・ 屈曲エアチューブの復元力は、屈曲部で相互に接触した膜面に作用する内圧力に起因しており、その大きさは内圧に比例し、屈曲部の角度に依存する。

## 謝辞

本研究は、(財)能村膜構造技術振興財団の平成20年度研究助成を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Tensile structures : design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and membranes, Frei Otto, M.I.T. Press, 1967
- 2) 日本の膜構造作品選集, 石井一夫編著, SPS 1995
- 3) Soft shells: design and technology of tensile architecture, Hans-Joachim Scheck, Birkhäuser, 1997
- 4) Kawabata, M.: A Study on Effective Stiffness Evaluation of Dual-Wall Air-Inflated Membrane Structures, Proceedings of IASS, C1.11~C1.20, 1999
- 5) エア・ビーム構造物の簡易数値解析手法に関する研究, 永谷 秀樹, 瀬川 信哉, 遠藤 典男, 三井 康司, 笹川 明, 日本建築学会構造系論文報告集 No.449, pp133~141, 1993
- 6) 河端昌也, 石井一夫: エアビームの構造的性状について, 膜構造研究論文集'92, (社)日本膜構造協会, pp.25~31, No.6, 1992.
- 7) 河端昌也, 石井一夫: エアビームの構造特性について, 膜構造研究論文集'93, (社)日本膜構造協会, pp.47~56, No.7, 1993.
- 8) 河端昌也: トラス要素四辺形モデルによるエアチューブ式アーチの極限状態解析, 膜構造研究論文集'97, (社)日本膜構造協会, No.11, pp.47~53, 1997.

---

# Morphological potential and unfolding forces of folded air-tubes

Masaya Kawabata <sup>\*1)</sup>  
Miwa Mori <sup>\*2)</sup>  
Singo Muramoto <sup>\*3)</sup>

## SYNOPSIS

This paper describes the structural and morphological potential of folded air-tube structures. Straight cylindrical air-tube is folded at the vertices of polyhedron and each vertex is bound together keeping the passage of air in the cylinder in order to inflate from one end to the other. Eulerian path configuration enables the whole members from one cylinder without cut and weld. Pantograph mechanism is found in cuboctahedron and the unfolding force is examined. Air-tubes using compressed air are extremely lightweight. If substantial deformation is induced by an external force, however, they are susceptible to a loss of membrane tension leading to the wrinkles in the air-tubes and, with further deformation, to structural instability. Therefore, a basic design requirement is that the tensile stress limit on the air-tube side under tension not be exceeded, while the tension on the side under compression is maintained. Because air itself has no inherent limitation on shape recovery, on the other hand, deformation and wrinkles may be permitted so long as they pose no structural or functional problems. Many structural configurations are thus possible.

\*1) Dr.-Eng. Associate Prof., Department of Architecture and Building Science, Faculty of Engineering, Yokohama National University

\*2) Director, KEY ARCHITECT

\*3) Engineer, JFE Engineering