ゴム人工筋肉に関する基礎的研究*

田 中 豊^{*1}, 岡 田 利 一^{*2}

Fundamental Study of Artificial Muscle Made of Rubber

Yutaka TANAKA and Toshikazu OKADA

In this paper, a new type of microactuator applicable to the artificial muscle for driving robots has been devised and analytical procedures for designing the actuator have been derived. The actuator has the characteristics of simple structure, flexibility, and is given the moving and deforming abilities of bending, waving, holding, and coiling according to the arrangement of a longitudinal reinforcing fiber. Several types of rubber actuators were prepared, and their static characteristics were measured and compared with the theoretical ones. Some applications were also considered. It was found that the holding force should be estimated in consideration of three-dimensional stresses and an increase in an inner diameter, and that the actuator using the material of lower Young modulus gives stronger force if the other states are under the same conditions.

Key Words: Robotics, Mechatronics, Manipulator, Artificial Muscle, Rubber Tube, Flexibility, Holding Force, Reinforcing Fiber, Actuator

1. 緒 言

医療用ロボットのみならず工業用ロボットを進化させるために、人間の手の代わりが出来るような柔軟運動を可能とするアクチュエータの出現が期待されている。本論文の目的は、構造が単純で多自由度の柔軟運動が出来、しかも、設計製作が容易で、マイクロメカトロニクス分野にも応用できる人工筋肉を開発することにある。

空気、油圧を駆動源として人工筋肉の実現をめざしたものと、マッキベン人工筋肉、およびその実用化を目指したゴムアクチュエータ⁽¹⁾と応用例^(2,3)があり、さらに、小型化を目指したものと、管内に3室を有し、3室内の圧力制御から3自由度の動きが可能なアクチュエータ⁽⁴⁾が登場している。しかしながら、前者は大きな力が発生できるけれども、小型化が困難であり、圧力と発生力の間に強い非線形性が現れること、後者は小型ではあるが、構造が複雑で、あ

る限度以上の小型化が難しいこと、また、正確な設計のためには有限要素法を用いざるを得ないこと、3室の圧力を調整せねばならないことなどの欠点がある。

著者らは、このような従来技術の欠点を除く意味で、そのまま人工筋肉として利用でき、かつロボットハンドにも応用可能なゴム筋肉駆動機構を考案した。ここでは、その設計、解析手法を表すとともに、静力学特性について調べた結果について述べる。

2. 主 要 記 号

A : 断面積, $A = \pi (r_0^2 - r_1^2)$, $A_1 = \pi r_1^2$
 E : 母材管の縦弾性係数
 F, F_0 : 保持力, 圧力による力
 G : 母材管の横弾性係数 $= E/[2(1+\nu)]$
 I : ゴム管の断面二次モーメント
 L : ゴム管の長さ
 M : 曲げモーメント, $M_0 = M \cos \alpha$, $M_1 = M \sin \alpha$
 N : 軸方向強化繊維の長さ
 p : 圧力

* 原稿受付 平成3年4月30日。

^{*1} 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。^{*2} 東岡山工業高等学校 (〒703 岡山市土田290-1)。

- r, r_i : ゴム管中心軸から測った半径方向距離
 R_i : 管の曲がり変形の内側曲率半径
 $T_{r,i}$: 座標変換行列, $T_{r,i}$ は単位行列
 $(x, y, z), (x_i, y_i, z_i)$: カルテシアン座標系
 α, β, θ : 角度
 ϕ : 曲がり管を曲率中心から見た角度 $= \Delta L_i / R_i$
 ε : ひずみ
 η : 中立軸から測った R_i 外向き方向の距離
 ν : 母材管のポアソン比
 σ : 応力

添字

- 1, 2, 3 : 管の内側, 円周方向強化繊維の内側, 管の外側
 b, e : 曲げと伸び
 ■ : 断面または円周方向の平均
 x, r, t : 円筒座標系での軸, 半径, 円周方向
 x, y, z : カルテシアン座標系
 ' : 圧力を加えた状態

3. ゴム人工筋肉の構造と静力学

3.1 人工筋肉の構造 図1にゴム管を利用して製作したマイクロアクチュエータの構造を示す。柔軟、かつ弾性変形範囲が広いゴム管（半径 r_1 と r_2 の間：シリコンゴム、生ゴム管などが用いられこれを母材管と呼ぶ）の周囲に、ゴム管径の 1/100 程度の強化用繊維を密に巻き母材管に母材管と同質の接合剤で接合する（半径 r_2 と r_3 の間）。これを円周巻き強化繊維と呼ぶが、これは、図に示すようにゴム管の一端を塞ぎ、他端の管支持具を通じてゴム管内に圧力をかけたとき、ゴム管の膨張を抑止し、ゴム管を単にその軸方向にのみ伸張させる働きをなす。さらに、別の強化用繊維を管軸方向に沿って接合するが、これを軸方向強化繊維と呼ぶ。図1の例では軸方向強化繊維を中心軸

図1 アクチュエータの構造

に対して角度 α で接合してあるが、この強化繊維は繊維位置における伸びを抑止し、繊維位置を中心として管を曲げる働きとともに、繊維軸回りに管を回転させる働きをなす。この軸方向強化繊維を効果的に配置することより、ゴム管に多自由度かつ任意の変形を起こし得る。単純な構造の採用と駆動方式が最大の特徴である。

3.2 力学的解析 圧力を加えると、ゴム管は強化繊維の働きにより伸び、曲げとねじりの作用を受けて変形する。この時、圧力は 1MPa 以内、ゴム管母材の弾性係数、強化繊維の縦方向弾性係数はそれぞれ 2MPa, 7000MPa 程度である。これらの値の比較から解析に当たり考慮すべき点を述べると次のようになる。

(1) 強化繊維の弾性係数が母材の値に比して大きいから、母材の変形に比較して繊維の変形を無視できる。すなわち円周強化繊維層における管の円周方向のひずみと軸方向強化繊維の位置での管の繊維方向伸びを零とすることが出来る。ただし、円周強化繊維層の管軸方向のひずみと管軸回りのねじりは母材管に対して適用される力学と同一の式で算定される。

(2) 加える圧力の大きさは母材の弾性係数に対して無視できない大きさであり、3軸応力場としての解析がなされなければならない。

なお、(1)の点において、繊維方向のひずみとそれに伴う異方性を考慮した解析も可能であるが、式が極端に複雑になることと得られた結果に大差が見られないことから、この論文では(1)の近似に基づく解析と結果を示すことにする。

図2に示すように管が内側曲率半径 R_i で曲がった場合について、圧力と母材管断面に働く力 $F_p = \int \sigma_r \cdot dA = \sigma_{r, \text{平均}} \cdot A$ の関係を考える。図の η 方向の力のバランスを考えると

$$\int_0^{2\pi} d\beta \left[\int_{-\phi_1/2}^{\phi_1/2} d\phi \cdot p_1 \cdot r_1 \cdot \sin\beta \cdot (R_i + r_2 + r_1 \sin\beta) \cos\phi \right] = 0$$

図2 アクチュエータに働く力の釣り合い

$$-2 \sin(\phi_1/2) \int_{r_1}^{r_2} \sigma_x r dr = 0 \quad \dots\dots(1)$$

であり、この積分から

$$F_p \equiv \sigma_{xm} A = p_1 A_1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

すなわち、直円管と同様に管軸方向に働く力は内断面積と圧力の積と常に釣りあっていることが知られる。

(x, r, t)円筒座標系での3軸応力場での基礎式は

$$\left. \begin{aligned} E \varepsilon_x &= \sigma_x - \nu(\sigma_r + \sigma_t) \\ E \varepsilon_r &= \sigma_r - \nu(\sigma_x + \sigma_t) \\ E \varepsilon_t &= \sigma_t - \nu(\sigma_x + \sigma_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

厚肉管内部にゲージ圧力 p_1 が働く場合の材料力学基礎理論では半径応力 σ_r と円周応力 σ_t の関係は⁽⁸⁾

$$\sigma_t = \sigma_r + r \cdot d\sigma_r/dr \quad \dots\dots\dots(4)$$

簡単化のため管端からやや離れた断面内の軸方向応力 σ_x は中立軸からの距離 η には関係するが、半径 r には無関係であり、したがって、 σ_r と σ_t の和が r に無関係であるとの仮定を用いる。式(4)を $r=r_1$ で $\sigma_r=-p_1$ となる境界条件のもとで解くと、積分定数をDとおき

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -p_1 + (1/r^2 - 1/r_1^2) D \\ \sigma_t &= -p_1 - (1/r^2 + 1/r_1^2) D \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

式(5)を式(3)に代入し、近似(1)に従って $r=r_2$ において円周ひずみ $\varepsilon_t=0$ の境界条件のもとでDを決定すると

$$D = - \frac{p_1(1-\nu) + \nu \sigma_{xm}}{(1+\nu)/r_2^2 + (1-\nu)/r_1^2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

すなわち、式(5)、(6)の関係から σ_r 、 σ_t は半径と軸方向応力の関係で表されることが知られる。また、半径 r_1 における円周方向平均ひずみが r_{1m}'/r_1-1 に等し

図3 アクチュエータの変形

いことから、圧力を加えた場合の平均の内側半径 r_{1m}' が計算される。

$$r_{1m}'/r_1 = 1 + \frac{[(1-\nu)p_1 + \nu \sigma_{xm}][(1+\nu)(r_2^2/r_1^2 - 1)]}{E[(1-\nu)r_2^2/r_1^2 + 1 + \nu]} \quad \dots\dots\dots(7)$$

3. 3 ゴム管の変形

図3に示すように原点 O_1 を持つ $O_1(x_1, y_1, z_1)$ 座標軸を考え、その x_1 軸上に中心軸をおくゴム管の変形を解析するが、説明を容易にするために、まず、その一部の長さ ΔL_1 のゴム管についての変形を考えよう。縦方向強化繊維は $x_1=0$ の断面で黒丸で示す $y_1=r_2$ の位置を起点とし、 y_1 軸から z_1 軸に向かってコイル状に巻かれ、圧力をかけないとき、 $x_1=\Delta L_1$ の断面では同じく黒丸で示す角度 $\Delta\beta$ の位置に至る。ゴム管を外部から見たときの長さ ΔN の強化繊維の管中心軸に対する傾き角を α とおいたから、 ΔL_1 と ΔN_1 、 α と $\Delta\beta$ の関係は

$$\Delta L_1 = \Delta N_1 \cos \alpha \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$r_2 \Delta\beta = \Delta L_1 \tan \alpha \quad \dots\dots\dots(9)$$

変形の結果として、ゴム管の長さが $\Delta L_1'$ になったとする。ゴム管は強化繊維を内側に y_1-z_1 平面上に位置する点Qを中心とする曲率半径 R_1 の円周上に位置するように変形する。また、圧力を加えないときのゴム管の他端 $x_1=\Delta L_1$ の中心 O_1' は圧力を加えることにより、 O_1 の位置に移動する。ただし、直線 O_1Q と y_1 軸とのなす角および直線 O_2Q とゴム管先端の O_2 から強化繊維を通る y_2 軸のなす角 $\Delta\beta'/2$ は、ねじり変形後の角度 $\Delta\beta$ の半分に等しく、この変形後の配置に従って点Q、 O_2 が定められる。

変形後の他端の中心 O_2 を原点としたゴム管の中心軸方向を x_2 軸、中心から強化繊維に向かう方向を y_2 軸、 x_2 軸を中心に y_2 軸を90度時計回りに回した軸を z_2 軸とする。この変形において、 QO_2 を結ぶ直線は x_1 軸と交わり、その交点をP点とすると、変形後のゴム管は $\triangle QO_1P$ を含む平面上に位置し、かつ、 $\angle QO_1P$ は直角である。角度 $\angle O_1QP$ を ϕ とおく。

3. 4 ゴム管に働く力と曲げモーメント

ゴム管が強化繊維の働きにより伸び、曲げとねじりの作用を受けて変形する。この時、伸びひずみ ε_{xx} とはゴム管の断面内に一様に生じるものであり、曲げひずみ ε_{yy} は一様に生じないひずみによるものであるが、それぞれの大きさはゴム管の拘束条件により変わる。

内側曲率半径が R_1 となる時にゴム管内部に生じる曲げひずみ ε_{yy} は、図2中のゴム管中心軸から測った曲率の外向き距離 $\eta=r \sin \beta$ を用い

$$\varepsilon_{x_0} = (r_0 + \eta)/R_1 \quad \dots\dots\dots(10)$$

一様伸びひずみ $\varepsilon_{x_0} = d\Delta L_1/\Delta L_1$ は、軸方向繊維長さが変わらないとする条件のもとで、式(8)、(9)を微分することより得られる。

$$\varepsilon_{x_0} = -r_0 \tan \alpha \, d\Delta\beta/\Delta L_1 \quad \dots\dots\dots(11)$$

曲げモーメント M は軸方向強化繊維方向に発生し、その管軸方向成分 $M_x = M \cos \alpha$ が曲率半径を R_1 となるようにゴム管を曲げ、管軸に直角方向の成分 $M_z = M \sin \alpha$ が α 、 β を小さくさせるようにねじる。すなわち、

$$\frac{1}{R_1} = \frac{M_x}{EI} \quad (12), \quad d\Delta\beta = \frac{-M_z \Delta L_1}{2GI} \quad (13)$$

式(11)に式(13)を代入すると、軸方向ひずみ ε_x は

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_{x_0} + \varepsilon_{x_1} \\ &= \frac{r_0 + \eta}{R_1} + \frac{M_z r_0 \tan \alpha}{2GI} \end{aligned} \quad (14)$$

式(3)の第1式に式(5)、(6)を代入し、断面積 A について積分し、式(12)を用いて整理するとゴム管に働く曲げモーメント M と圧力による力 F_p の関係が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{MAr_0}{l} \left[\cos \alpha + \frac{E}{2G} \tan \alpha \sin \alpha \right] \\ = F_p \left[1 - \frac{2\nu^2}{(1+\nu)r_1^2/r_0^2 + 1 - \nu} \right] \\ + 2\nu p_1 A \left[1 - \frac{1-\nu}{(1+\nu)r_1^2/r_0^2 + 1 - \nu} \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(15)$$

以上で曲げモーメント M と曲率半径 R_1 、圧力による力 F_p の関係が得られた。これらの式はゴム管に圧力を加えると強化繊維方向に一様な曲げモーメントが発生し、これがゴム管の曲げとねじりを同時に発生させることを表す。図1において α を零としたゴム管を保持具として利用することを考える。同図に示したようにアクチュエータの左端を固定端とみなし、加圧によりたわんだ右端に曲率の外向きに力を加えて右端を初期の軸上に戻すに必要な力（以降ではこれを保持力と呼ぶ）はゴム管の変形が小さいとき、

$$F = 3M/L \quad \dots\dots\dots(16)$$

3. 5 ゴム管の変形の解析 圧力を加えた結果、

$\Delta\beta$ は $\Delta\beta'$ に変わること注意到、 O_0 の (x_1, y_1, z_1) 座標系での位置 $[\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1]$ は、 $\angle O_1QP$ を ϕ ($=\Delta L_1'/R_1$) とおいたから

$$\begin{aligned} [\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1] &= \\ &[(R_1 + r_0) \sin \phi \\ &\quad (R_1 + r_0) (1 - \cos \phi) \cos(\Delta\beta'/2) \\ &\quad (R_1 + r_0) (1 - \cos \phi) \sin(\Delta\beta'/2)] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$O_0(x_0, y_0, z_0)$ 座標軸上での位置 $[x_0, y_0, z_0]$ を $O_1(x_1, y_1, z_1)$ 座標系に変換する。この変換は x_0 軸回りに角度 $-\Delta\beta'/2$ 、 z_0 軸回りに $-\phi$ 、 x_0 軸回りに $-\Delta\beta'/2$ 回した後、 $[-\Delta x_1, -\Delta y_1, -\Delta z_1]$ の平行移動を行うことに等しく、結果として次の変換式(18)が得られる。この O_0 座標軸回りの回転操作の結果が、曲げモーメント M が働いて、長さ ΔL のゴム管の平均のねじりと曲げ変形を起こす力学的変形結果に等しい。

$$\begin{aligned} [x_1, y_1, z_1] &= \\ [\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1] &+ [x_0, y_0, z_0] T_{r_2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(18)$$

ただし、変換行列 T_{r_2} は

$$\begin{aligned} C_\phi &= \cos \phi, \quad C_\beta = \cos(\Delta\beta'/2) \\ S_\phi &= \sin \phi, \quad S_\beta = \sin(\Delta\beta'/2) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(19)$$

といて、

$$T_{r_2} = \begin{bmatrix} C_\phi & C_\beta S_\phi & S_\beta S_\phi \\ -C_\beta S_\phi & C_\phi^2 C_\beta - S_\beta^2 & C_\beta S_\beta C_\phi + C_\beta S_\beta \\ S_\beta S_\phi & -C_\beta S_\beta C_\phi - C_\beta S_\beta & -S_\beta^2 C_\phi + C_\beta^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(20)$$

で表される。 O_0 座標系の前方に位置するゴム管についても同様に解析でき、 O_0 座標系の位置 $[x_0, y_0, z_0]$ は O_1 座標系で観察すると、

$$\begin{aligned} [x_1, y_1, z_1] &= \sum_{i=1}^{n-1} [\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i] \\ &\quad \cdot T_{r,1} \cdot T_{r,2} \cdot \dots \cdot T_{r,n-1} \cdot T_{r,n} \\ &\quad + [x_0, y_0, z_0] T_{r,1} \cdot T_{r,2} \cdot \dots \cdot T_{r,n-1} \cdot T_{r,n} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(21)$$

図4 実験装置の構成

4. 実験と計算結果の比較検討

4.1 アクチュエータの準備と実験装置 母材管として、内外径の異なる種々のシリコンゴム管と生ゴム管を用意した。強化繊維として縦弾性係数6700 MPa、直径0.125mmの生糸を用いた。これを母材管に同質の接合剤で接着させ、供試用アクチュエータとした。母材管の縦弾性係数は引っ張り試験により測定し、得られた値が妥当かどうかは加圧時の曲率半径の測定から確認した。計算ではポアソン比を0.45とおいた。

図4に実験装置の構成を示す。コンプレッサから送られた圧縮空気はサーボバルブ・ドライブユニットにおいて計算機で指示された圧力に制御され、ゴムアクチュエータに送られる。保持力はゴム管先端に力ゲージを取り付け、先端を加圧前のゴム管中心軸上に戻すに必要な力として測定した。ただし、保持力測定において圧力を大きくするとゴム管が回転し、力ゲージの測定方向とゴム管に発生する力の方向に差が生じるため、測定は比較的低い圧力でのみ行った。

加圧時の管長、内径、断面二次モーメント、保持力など全ての値はその圧力においてバランスすべきものであるから、それらは加圧時の値を用いて算出されなければならない。それゆえ、加圧時の内径 $r_{i,m}$ と管長 l を、まず式(7)、(11)より見積り、他の値は逐次近似計算によって求めた。

図5 圧力と曲がり角度の関係 ($\alpha = 0$)

図6 圧力と曲率半径の関係 ($\alpha = 0$)

4.2 軸方向強化繊維の方向を中心軸方向と等しくした場合 この場合は、 α が零であり、圧力を加えると、ゴム管は縦方向強化繊維が常に内側となるように曲がる。したがって式(15)の左辺は MAr_3/l に簡略化される。

図5は長さ50mmのシリコンゴム製のアクチュエータ管について調べた圧力と曲がり角度($\pi - \phi$)の関係を示す。破線は内径変化を無視した場合、実線は3軸応力場での内径変化を考慮した場合の計算結果である。圧力が小さいとき、内径を一定とした計算結果でも、白丸で示す実験結果に一致するが、圧力の増加とともに計算と実験結果の間の隔たりが著しくなる。実線で示す内径変化を考慮した場合の計算結果は実験結果とほぼ完全に一致する。このことはこの種のゴム管の変形解析には3軸応力と内径変化の考慮が必要不可欠であることを意味する。圧力と曲がり角度の関係は直線関係からずれているが、過大圧力を加えない限り再現性があり、このアクチュエータを圧力指示計として利用することも可能である。

図6は圧力と曲率半径の関係を2種類の生ゴム管について示してある。圧力を加えないときは当然のことながら、曲率半径は無限大であり、圧力を加えるとゴム管は円形の一部となるように変形し、その曲率半径は圧力の増加に反比例して減少する。計算結果はこの点を明確に示している。

図7 圧力と保持力の関係 ($\alpha = 0$)

図8 圧力と保持力の関係 ($\alpha = 0$)

図7, 8は圧力と保持力の関係を示す。図7において, 1点鎖線は内径増加を無視した場合, 破線は内径増加を考慮するが, 式(16)において加圧時の管長さ L を初期長さとおいた場合を示す。実線は解析の厳密さを考え, 軸方向強化繊維の長さが変わらないとする考えのもとに求めた保持力を表す。この時, 式(12)の左辺を d^2y/dx^2 で近似し, まず, その変形曲線の全長を強化繊維長さに一致させ, その元の中心軸上への投影距離を求めた。保持力は, 式(16)中の L の代わりに投影距離を代入して算出した。これら曲線と白丸で示す実験点の比較から次の結論が導かれる。

内径が変わらないとする近似で得られた保持力は圧力と比例関係にあって分かりやすいけれども, 実際の保持力よりも25%程度低く算定される。保持力の算定において, 実験の圧力範囲では, 変形が小さいとする計算結果と投影長さをもとに得た値の間で大きな違いは見られないが, 両者とも実験結果と良く一致する。両者の曲線は圧力の増加とともに上昇割合がわずかなではあるが大きくなる傾向にある。

図8は初期長さをパラメータとして, 投影長さをもとに得た保持力の計算結果と実験結果を比較している。当然のことながら圧力, 管径が同じならば, 発生する曲げモーメントが同じであり, しかも管軸方向に一樣

であるから, 保持力は管長さが短いほど大きくなる。計算結果は $L=50\text{mm}$ の場合, 対応する実験結果と少し違いがみられるが, その他の場合は実験結果と良く一致している。

式(15)の右辺 F_p 以外の項は式(3)第1式において σ_r, σ_t を考慮したときに生じる項である。図7において, 管内径に変化がないと近似し, $p_i = 0.2\text{MPa}$ の条件下での保持力は 0.34N である。これに対し, 同じ圧力条件下で管内径の増加を考慮するが, 式(3)の第1式の σ_r, σ_t の項を考慮しない場合, 保持力は 0.39N であるが, 考慮すると 0.45N となる。したがって, 保持力の増加に及ぼす応力 σ_r, σ_t の影響も大きいと言える。

内径増加を考慮するが, 式(15)を簡略化のため, 縦方向強化繊維を管軸に平行とし, かつ σ_r, σ_t の影響を無視した形で表現すると

$$M \approx l' F_p / (A' r_0) = \frac{\pi (r_0^2 + r_{1,m}^2) r_{1,m}^2 p_i}{4 r_0} \quad (22)$$

圧力負荷前の状態が同一であっても内径 $r_{1,m}$ は式(7)から明らかなように弾性係数 E が小さいほど大きくなる。内径だけについて考えると曲げモーメントは上式のように内径の4乗に比例することから, 大きな保持力を得るには E の小さい母材が望ましいことがわかる。

図9 コイル状変形の様子

図10 コイル状変形の様子

図11 圧力とコイル状変形時のコイル径の関係

図12 圧力とコイル状変形時のピッチの関係

4. 3 軸方向強化繊維を母材管の周囲にコイル状に巻いて接合した場合 図9, 10は内半径2mm, 外半径3.25mm, 長さ100mmのシリコンゴム管に縦方向強化繊維を1巻き(管中心軸に対する傾斜角 $\alpha=7.5^\circ$)したものに圧力を加えていく場合のコイル状変形の計算結果を示す。両図において, ゴム管は左端を原点とし, この部分で加圧用保持具に連結されている。

図9は60度右上から観察したもので, 図10は変形後のコイル状態の主軸をゴム管の両端について求め, 得られた主軸に対してゴム管を投影したものである。図中のプラス丸印と点丸印はコイル状態で左端の縦方向強化繊維初期位置とそれぞれコイル中心軸回りの角度 π , 2π ラジアン(180° , 360°)だけ隔たった関係にある位置を示す。図11, 12は全長150mm($\alpha=8^\circ$)のゴム管についてコイル状変形を測定した結果と解析結果の比較であり, 図11はコイルの外径を, 図12はコイルのピッチを比較している。これから4図の観察から次の結論が導かれる。

縦方向強化繊維をゴム管の周囲に効果的にコイル状に巻いたものを準備し, 管内を加圧することによりゴム管をコイル状に変形できることが明瞭に示されている。圧力の増加に応じて, ゴム管の中心軸に沿って測った全長は次第に長くなるが, 縦方向強化繊維がコイルの内側となるように変形し, コイル長さは次第に減少する。なお, 図11, 12において圧力が0.05MPa以下では変形するがコイル状態が実現されていない圧力範囲である。

繊維初期位置と 2π ラジアンだけ隔たる位置は圧力が零の初期にはゴム管の両端の位置関係にあったが, 次第に全長より短い点に位置するように変化する。図11から明らかなように, コイル径は圧力の増加に応じて次第に増加し, ある圧力で最大になった後減少するカーブを描くことが知られる。図5のように縦方向強化繊維をゴム管中心軸に平行に接合したものを利用すると, ゴム管は円弧の一部となるように変形し, その曲率半径は圧力の増加に応じて反比例して減少する結果が得られたが, この結果と比較して図11は対象的である。図12から明らかなように, コイルのピッチは圧力の増加とともに次第に減少することが知られる。これらの結果は適度の圧力を加えることにより, ゴム管を所望の径とピッチのコイルに変形させることができることを意味し, 変形特性を利用する上で考慮すべき結果と言えよう。いずれの場合も, 解析結果は実験結果と良く一致し, この種の3次元の変形が比較的簡単な解析を用いて表現可能であると結論される。

5. 応用面での考察

以上の実験と計算結果を考察することより, この論文で開発されたゴムアクチュエータの応用を次に考察する。図13はこのアクチュエータで実現し得る基本的な動作を示す。

軸方向強化繊維が1本であり, 管軸に並行に配置されている場合には, ゴム管は, 軸方向強化繊維が内側となり, かつ変形した結果, 完全な円弧を描くように変形し, 円弧の半径 R は圧力に反比例する。従ってこのゴムアクチュエータは基本的には前述のように圧力計としての利用も可能である。長いゴム管を用意し, 対象物に近づけてゴム管を配置すれば, 図13上図に示すようにゴム管は対象物に巻き付く動作をする。

複数のゴム管を対向配置し, それらに圧力をかければつかみ動作をなすから, 人工の手として利用できる。また複数のゴム管を並列配置すれば力を倍増できるだけでなく, ユニバーサルジョイントの部分に取り付ければジョイントを好きな角度に傾斜させることができる。この意味から, このアクチュエータは人工の筋肉としての利用も期待される。

軸方向繊維を, 交互に並行になるようにゴム管の外側に接合したものを用意しゴム管に圧力を加えると, ゴム管は蛇のように波動変形をなし, 2個の対象物の間にゴム管を配置すると, 対象物を押し広げようとする作用をなす。図13中図は波動の動きを示す。

コイル巻き縦方向繊維により, ゴム管自体をコイル状に変形できることから次のような利用も可能である。このゴム管を対象とする円管の内部に配置し圧力を加えると, ゴム管は円管を押し広げようとする作用をなす。図13下図は大きなパイプ内に設置した場合のらせん圧し保持の例を示す。

図13 アクチュエータの基本動作

このように、このアクチュエータの特徴は、軸方向強化繊維の接合方法を変えることにより、単純な円弧状曲げ変形を基本として、巻き付き、波動、コイル変形など多様な変形をなすことにある。ゴム管の断面形状と管径を軸方向に変えたり、軸方向強化繊維の配置と本数を変えることにより、また、ゴム管の数を増やすことにより、さらに多くの組み合わせ変形が可能であり、人工の筋肉、マニピュレータなどへの応用が可能である。

なお、加圧によって生じる曲げモーメントは管軸方向に一樣であるが、保持力による曲げモーメントは保持点からの距離に比例して大きくなるから、保持力が管の曲がり打ち消すように働いてもたわみは一樣に回復しない。保持力によって管のたわみが一樣に回復されるような管の断面形状としては、保持力が働く位置から管支持点方向に測った距離 x に曲げモーメントが比例するような ($M - Fx = 0$ を満足する) 断面形状とすれば良いことになる。管の内外径比を $\lambda = r_1/r_2$ とおくと、式(22)より

$$r_2 \propto x^{1/3} / [\lambda^2(1 + \lambda^2)]^{1/3} \dots\dots\dots (23)$$

この結果は、軸方向に λ が一樣な管を考えると、保持力により一樣にたわみが回復するようなアクチュエータを得るには、保持力が働く点からの距離の3乗根に比例するような管径のものを使えば良いことを表す。保持力 F は曲げモーメント M に比例し、 M は管径 r_2 の3乗に比例すると近似できるが、このことは小さな力から大きな力までの広い範囲の制御に利用できるものを準備しやすいことを意味する。とくに、これまでのアクチュエータにはない微小な力の制御の面で有利である。

6. 結 言

この論文では、人工筋肉への応用を目指して新しい

タイプのゴムアクチュエータを開発するとともに、動作原理、その設計法と基本的な応用例を示した。このアクチュエータは縦方向強化繊維の配置を変えるだけで、曲げ、つかみ、波動運動、コイル状変形など各種の柔軟運動が出来る。小型化が容易、構造が簡単という特徴を持っている。実験と解析結果の比較を通じて得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) アクチュエータの静力学特性は初等材料力学で把握できるが、母材の弾性係数の大きさに比して負荷する圧力が無視できず、圧力による内径変化を考慮する必要がある。正確さのためには3軸応力場の計算が不可欠である。

(2) 圧力、管径が同一であっても、弾性係数の小さなものほど大きな保持力を与える。同一圧力ならば、保持力は管径のほぼ3乗に比例して大きくなる。

(3) 縦方向強化繊維をゴム管にコイル状に巻いた場合、圧力を加えることによりゴム管もコイル状に変形する。そのピッチは圧力の増加に応じて次第に減少するが、その直径は一度上昇し、最大となった後減少する曲線を描く。

参 考 文 献

- (1) 例えば、高森 年，アクチュエータ革命，工業調査会，100-115.
- (2) 宮田慶一郎 他3名，空気圧ゴム人工筋の特性と制御，ロボティクス・メカトロニクス講演会'89講演概要集，(平1-6)，142-143.
- (3) 福田繁男，細目英実，空気圧ゴムアクチュエータを用いたマニピュレータ，同上，138-139.
- (4) 鈴森康一，フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究，第1報，機論C編(平1-10)，2547-2552.
- (5) 例えば，竹園茂男，基礎材料力学，(昭58-4)，朝倉144.