

Fig.3.7 Cross-section of the three layers rubber tube

細型人工筋に適用する端末は、高い圧力に耐えるため、動作流体の供給とスリーブ・ゴムチューブの固定の2点である。高圧流体の印加に耐える端末形状と固定手法の考案が重要となる。先行研究においても、高圧印加可能な端末の開発に取り組んできた。これは、端末本体、端末を上下から挟み込むクランプ、スリーブを保護するスカートパーツ、ホースバンド、スリーブ引き込み防止用リングの5点から成っている。外径40mmの人工筋に対して、これまでに最大4MPaまでの流体印加を確認している。しかし、部品点数が多く、質量が大きい・コストが高いなどの問題があった。

人工筋の細型化にあたり、これらを改良した新端末を製作した。製作した端末の概観と図面を Fig. 3.8 に示す。

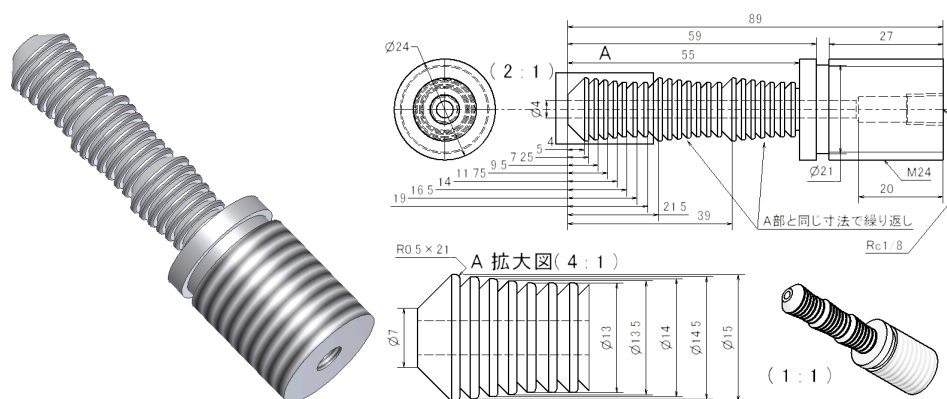


Fig. 3.8 Overview of special plug

内側の貫通穴に水圧供給用のカップラとニップルを取り付けるためのテーパねじ(Rc1/8)を施した。逆テーパ部分の最も外径の小さくなる場所をホースバンドで固定することで、端末が抜けそうになることを利用しさらにきつく締め付けることが出来る。開発した端末

に三層チューブ、ホースバンドを取り付けた際の縦断面図を Fig. 3.9 に示す.

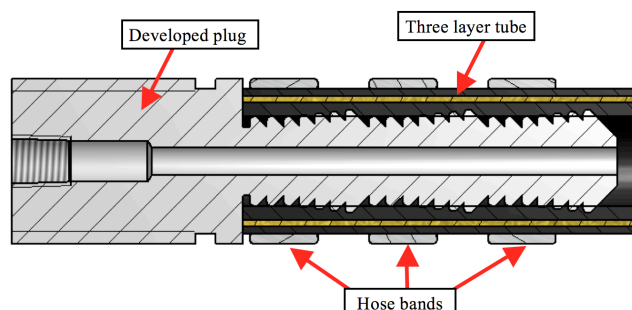


Fig.3.9 Cross section of new artificial muscle

3.2.2. 有限要素法を用いた最適編み角の導出

Marc を使用しパワーソフトメカニズムに適用する細型人工筋の実寸モデルの非線形有限要素法解析を行った. 解析には非線形有限要素法解析ソフトウェア MSC marc を用い, 編み角 60deg, 65deg, 67.5deg, 70deg, 実収縮部 400mm の伸長型人工筋に対して解析を行った Fig. 3.10 に編み角 67.5deg の人工筋の内壁の外向きに 2.0MPa を印加し動作解析した結果を, Fig. 3.11 に各編み角に対する印加圧力と伸長率の関係のグラフ示す. 非線形有限要素法解析に使用するモデルは実際に製作する人工筋肉の三層チューブと同じく外径 21mm , 内径 13mm, スリーブ径 17mm である.

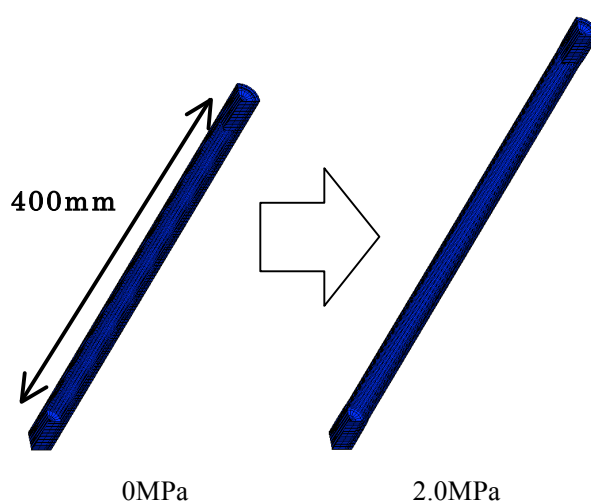


Fig.3.10 Nonlinear FEM analysis result ($q_0=67.5\text{deg}$)

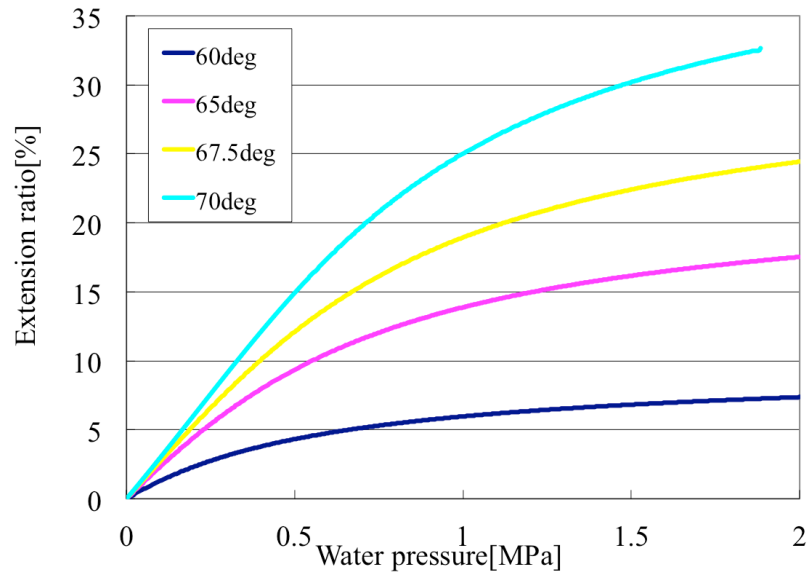


Fig. 3.11 Relationship between pressure and contraction length of artificial muscle with knitting several angle

3.2.3. 繊維とゴムチューブ材質の検討

水圧で駆動するMcKibben型人工筋のスリーブには加圧時に大きな負荷がかかる。発生力を大きくするにはより高い圧力を印加する必要があるため、本人工筋には有機系繊維の中では最高レベルの引張強度・弾性率を持ち、高い分解温度、難燃性を持つポリパラフェニレンベンズオキサゾール(PBO)繊維を使用する。PBO繊維は、1998年に東洋紡績株式会社によって開発された新しい繊維であり、「Zaylon-HM」という商標で市販化されている[3-10][3-11]。PBO繊維は、引張強度5.8GPa、引張弾性率270GPaと非常に高い値を示し、耐熱、耐火性にも優れている[3-12][3-13][3-14]。しかし、水や紫外線に当たると劣化する性質があるため水圧人工筋を駆動させる場合には注意が必要である。Fig. 3.12にPBO繊維の概観を、Fig.3.13にPBO繊維とアラミド繊維、ポリエステル、高強度ポリエチレンのStrain-Stress曲線をFig.3.14に融点とLOI(限界酸素指数)の比較を示す。

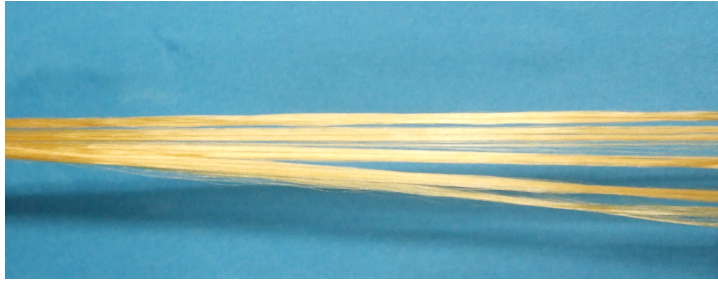


Fig. 3.12 Overview of PBO fiber

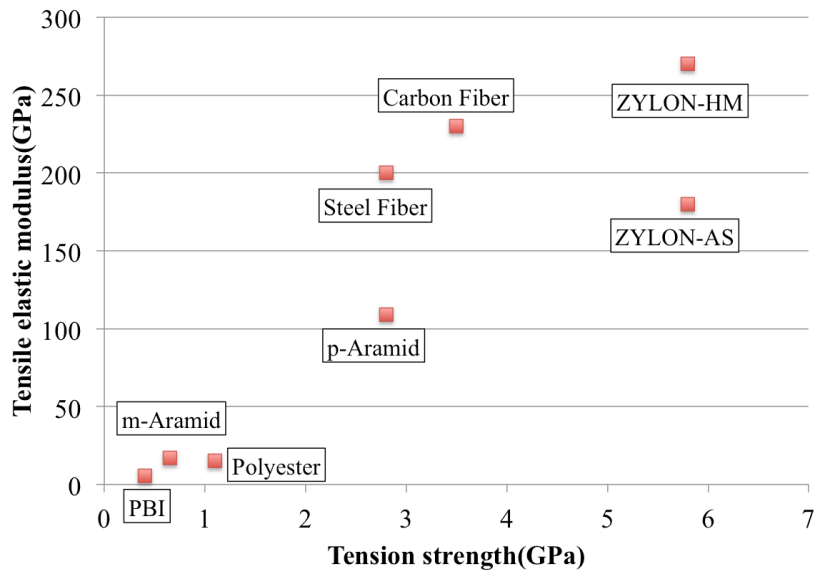


Fig. 3.13 Strength of fibers

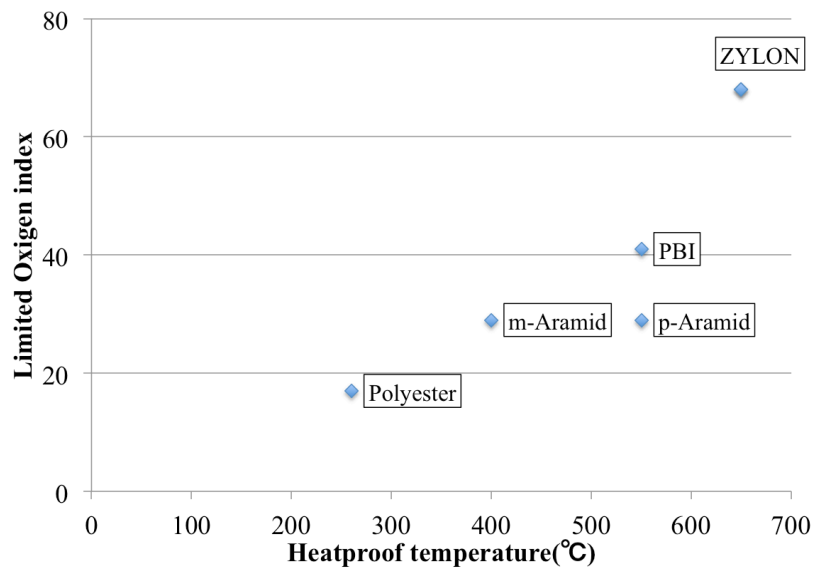
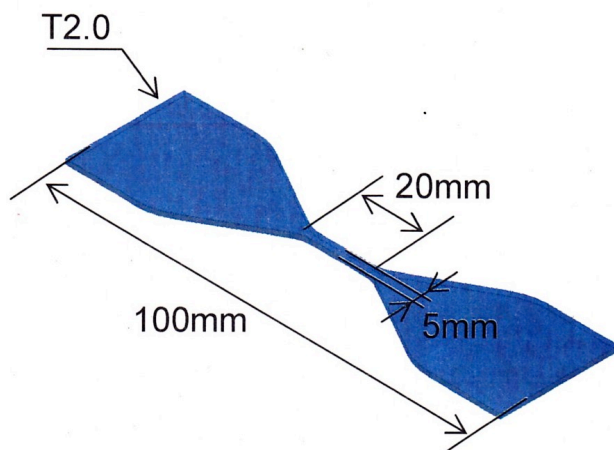


Fig.3.14 LOI of fibers

上図表からもわかるように PBO 繊維は他の特殊，高強度繊維と比較しても非常に優れた引張応力，引張強度，引張弾性率を持つ．この繊維を縫ったものを三層チューブに適用する．

細型人工筋肉にはクロロプレンゴムを使用する．加硫時に一体化できる柔軟なクロロプレンゴムは3種類あり，それぞれについて引張試験機を用いた材料特性計測を行った．クロロプレンゴムは型成形により JIS で定められたダンベル試験片 3 号を製作した．ダンベル試験片 3 号の形状と実際に製作した試験片を Fig.3.15 に示す．3 種類のゴムに対し 5 回引張試験を行い，平均の値をとることで誤差を小さくする．引張試験により導かれた応力—ひずみ曲線を Fig. 3.16 に示す．

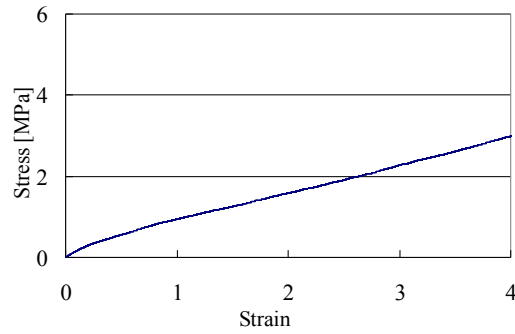


(a)Shape

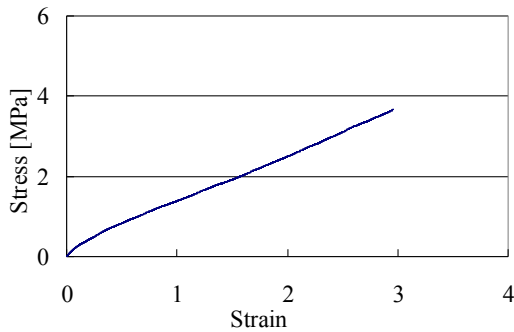


(b)Overviews

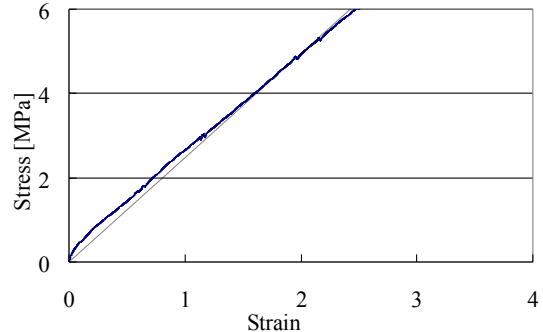
Fig.3.15 Dumbbell rubbers



(a) タケチゴム製 KR-8



(b) タケチゴム製 KR-9



(c) タケチゴム製 KR-10

Fig.3.16 Stress-strain curve of several rubbers

ヤング率は応力—ひずみ曲線の傾きから導出される。タケチゴム製の KR-8 は 0.8MPa, KR-9 は 1.3MPa, KR-10 は 2.5MPa となった。各ゴムの特性を Table 3.1 に示す。本研究で製作する伸長型人工筋は、最も破断しにくい KR-8 を用いる。

Table 3.1 Characteristics of chloroprene rubber

	KR-8	KR-9	KR-10
Hardness (Duro A)	48	60	72
Tensile strength [MPa]	11.6	13.6	12.1
Breaking elongation [%]	430	310	200
Young's modulus [MPa]	0.8	1.3	2.5

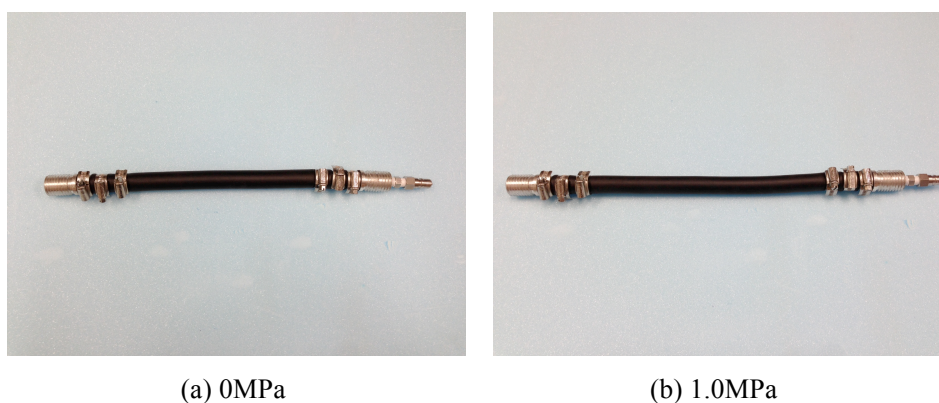
3.2.4. 水圧駆動 McKibben 型伸長人工筋の製作と特性評価実験

新たに設計，製作した三層チューブ，特殊末端を用いて人工筋を製作した．新たに製作する細型人工筋の片端を構成する部品すべてを Fig.3.17 に示す．従来の水圧人工筋と同じく水圧を印加するために末端の片端にはニップルを取り付ける．また，前節で述べたように末端と三層チューブを固定するためにホースバンドを使用する．



Fig. 3.17 Parts of high hydraulic artificial muscle

伸長型人工筋について駆動実験を行った．人工筋の実駆動部長さはそれぞれ 200mm であり，0MPa から 2.0MPa の水圧を印加した．製作した人工筋の外観と駆動時の様子を Fig.3.18 に，印加圧力による伸長率変化を 5 回計測した平均のグラフを Fig. 3.19 示す．



(a) 0MPa

(b) 1.0MPa

Fig 3.18 Overview of extension muscle

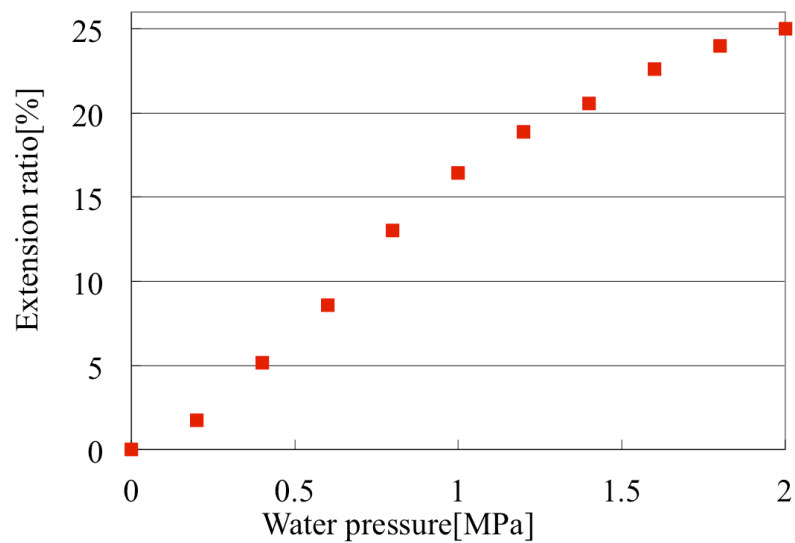


Fig. 3.19 Extension ratio to hydraulic pressure

実験の結果より、2.0MPa 印加時に最大伸長率 25%を確認した。これは非線形有限要素法解析の結果とほぼ等しい。

次に伸長型人工筋の軸方向の発生力を測定した。伸長型人工筋の力を計測する場合、両端を固定し水圧を印加すると座屈する。座屈を防ぐため三層チューブ周りを鉄パイプで覆った発生力計測用の伸長型人工筋を製作した。製作した伸長型人工筋の外観を Fig.3.20 に示す。



Fig.3.20 extension muscle for experiment

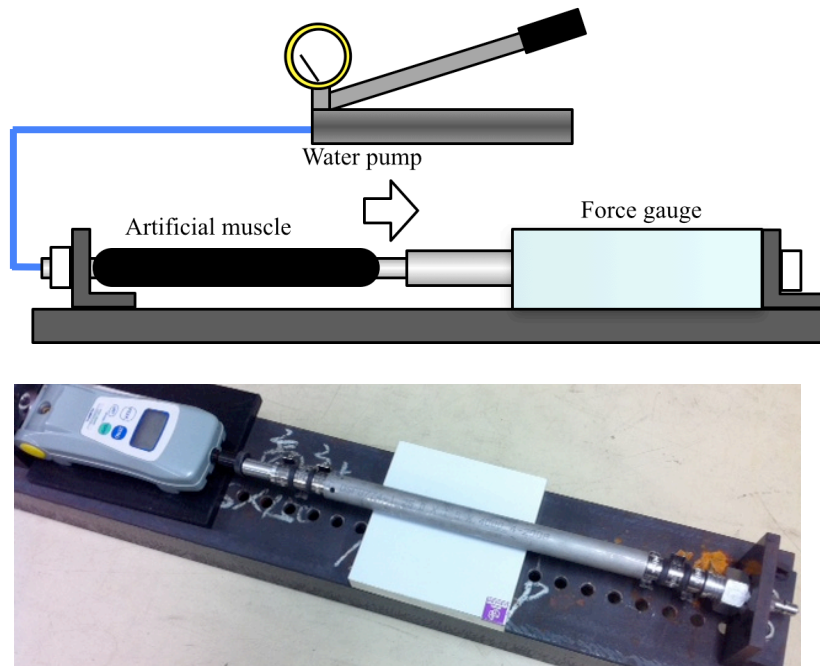


Fig.3.21 Experimental setup for extending force

人工筋の片端を固定しもう片端にフォースゲージを取り付けることで軸方向に発生する力を計測する。発生力の計測に油圧シリンダを使わなかったのは、伸長型人工筋の発生力は収縮型と比較して小さく、油圧シリンダの計測可能範囲から大きく外れるためである。印加した水圧に対する発生力と(3.1)式による理論値との比較のグラフを Fig.3.22 に示す。

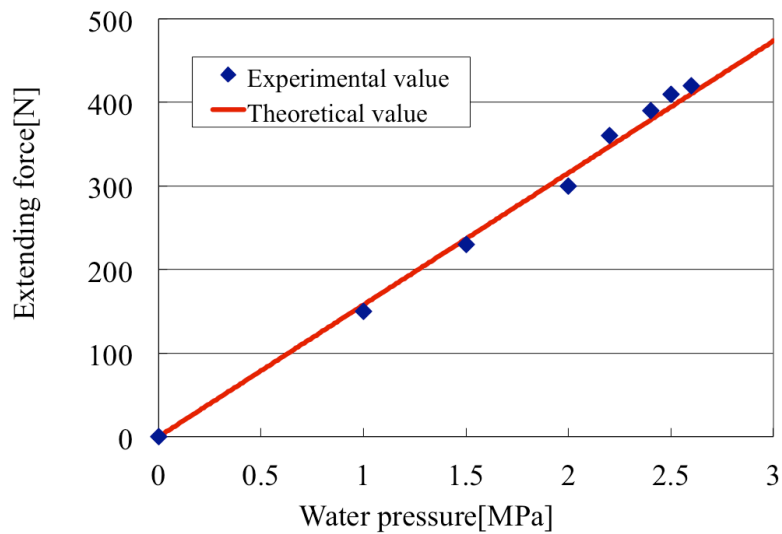


Fig.3.22 comparison of theoretical generative force and experimental values

実験より 2.6MPa 印加時に最大発生力 420N を確認した。実験は水圧を 2.8MPa 印加したときに鉄パイプで覆った箇所とホースバンドとの隙間で座屈が発生し中止した。グラフより伸長型人工筋肉の発生力は 1.0MPa 印加ごとに約 150N 上昇していることが分かる。この人工筋には最大で 30MPa 印加することが可能であるので、その時の発生力は 4500N となると考えられる。

3.3. 水圧駆動 McKibben 型収縮人工筋の細径化

伸／縮 McKibben 型人工筋の複合による水圧駆動エレファントトランクの中心に配置する収縮型人工筋外径は伸長型人工筋の外径により決定される。伸長型人工筋外径が 21mm であるので、収縮型人工筋外径は 15mm となる。また、変位率を同等とすることで効率的な湾曲が可能となる。これらの要素を考慮し外径 15mm の収縮人工筋を設計する。

3.3.1. 断面構造と固定方法の検討

細径化した人工筋についても伸長型人工筋と同様の 3 層構造のチューブを用いる。製作する三層チューブの断面寸法を Fig. 3.23 に示す。

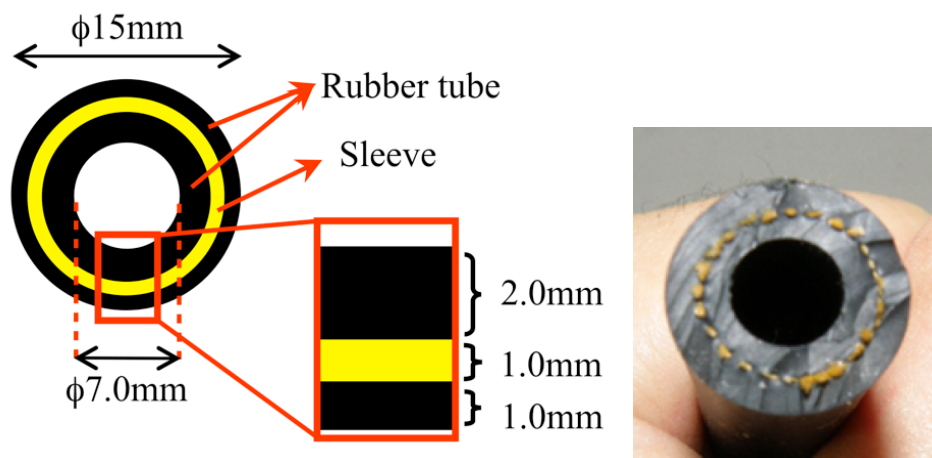


Fig. 3.23 Cross-section of the three layers rubber tube

伸長型人工筋と同じゴム層と繊維層の厚みにすることで、三層チューブの耐圧性能を同等となるようにしている。

収縮型人工筋のさらなる細型化にあたり、内径 7mm に適した新端末を製作した。製作し

た端末の概観と図面を Fig. に示す.

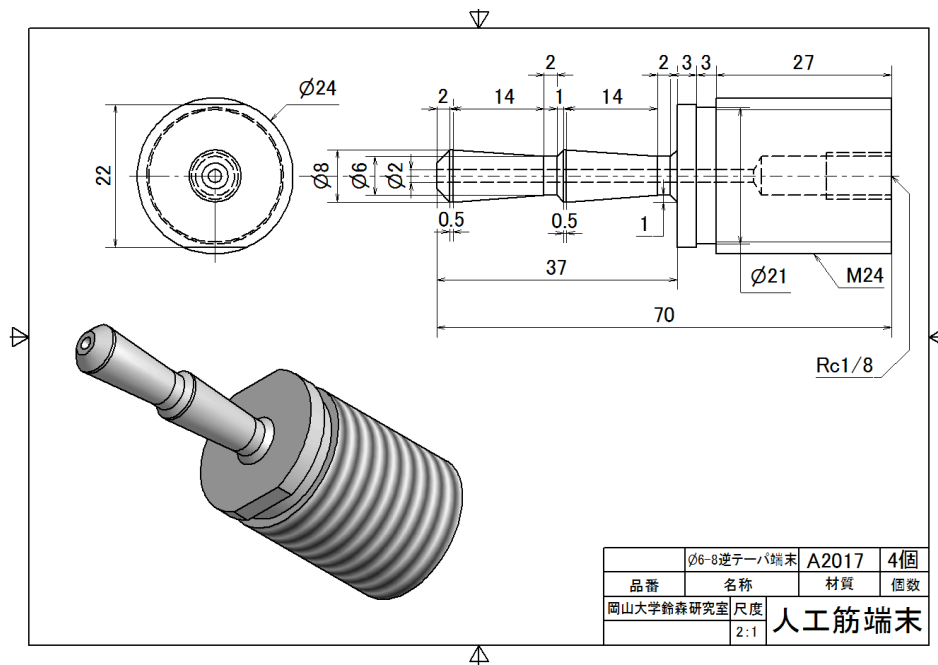


Fig. 3.24 Overview of small special plug

ホースバンドによる固定部が1つ少なくなり，逆テーパ部の複雑な段組が無くなっている。

3.3.2. 有限要素法を用いた最適編み角の導出

非線形有限要素法解析ソフトウェア MSC marc を使用し細型人工筋の実寸モデルの解析を行った。Fig. 3.25 にスリーブ編み角を 1deg 刻みで 30deg から 40deg まで変化させた時の収縮率のグラフを示す。

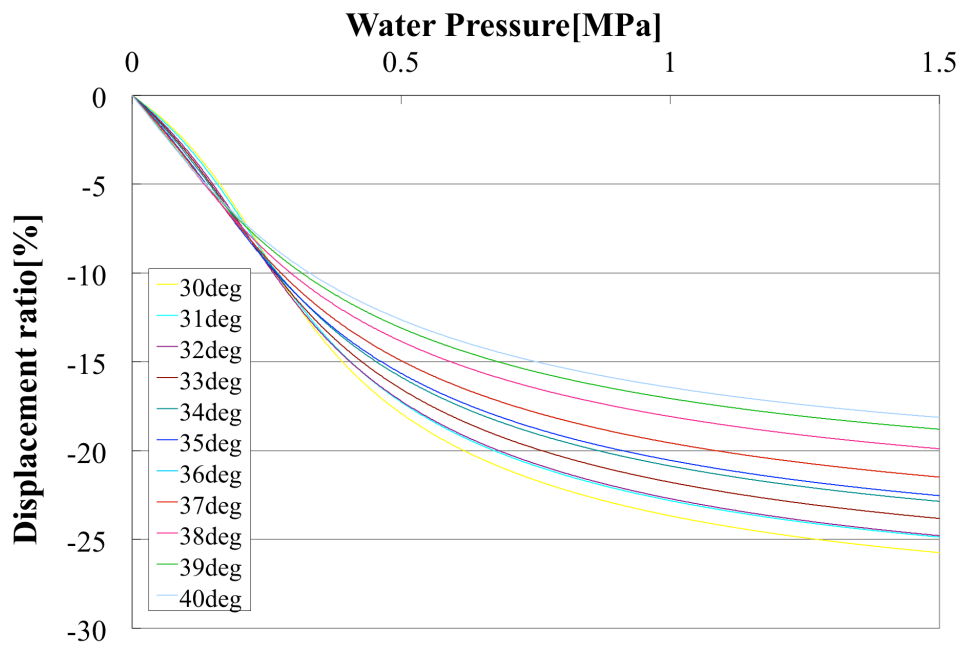


Fig. 3.25 Relationship between pressure and displacement ratio of artificial muscle with knitting several angle

解析結果より，編み角 34deg の人工筋は 1.5MPa 印加時に収縮率 23%を示し，前節で製作した伸張型人工筋と同等の変異率を持つことがわかった．この結果を元に細径化した収縮型人工筋を製作する．

3.3.3. 水圧駆動 McKibben 型収縮人工筋の製作と特性評価実験

細型の人工筋肉を製作し駆動実験を行った．製作した人工筋の実収縮部長さは約 400mm である．製作した人工筋とその人工筋に水圧 1.5MPa を印加した時の様子を Fig. 3.26 に示す．



(a)0MPa



(a)1.5MPa

Fig. 3.26 Driving experience of contracting muscle

駆動試験の結果、1.5MPa 印加時に最大で 25%収縮することを確認した。また、耐圧試験を行ったところ 5~8MPa 周辺で末端の抜けが発生したため実験を中止した。原因は末端の逆テーパ部の簡易化による摩擦力低下であると考えられる。

製作した人工筋の印加水圧に対する出力のグラフを Fig. 3.27 に示す。伸縮人工筋ともに理論値とほぼ等しい値を示す。

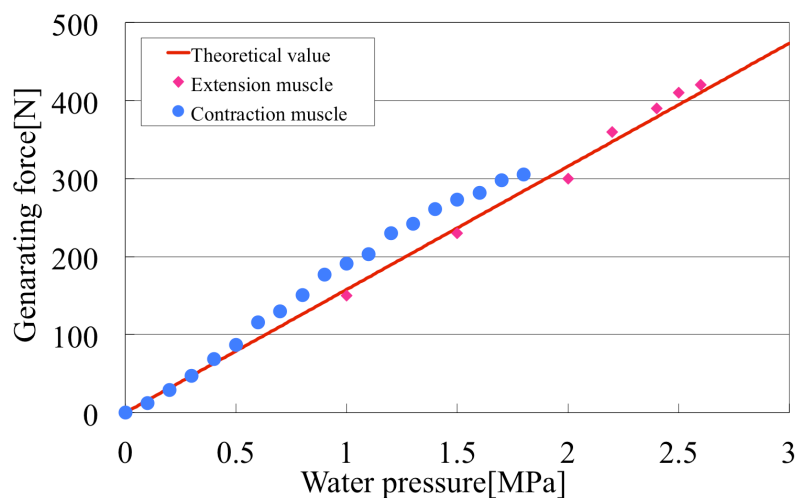


Fig. 3.27 Comparison of theoretical value and experimental results

3.4. 極細径 McKibben 型人工筋の開発

オクトアームに用いる人工筋は従来のもよりも細く製作する必要があるためゴム厚が薄くなり、耐圧性能が低下してしまう。そこで、極細径 McKibben 型人工筋の駆動源には水圧より印加圧力が小さい空圧を用いる。