

# ゴム材料の特性評価とその長寿命化に関する研究

## Research on Property Evaluation and Lifetime Extension of Rubber Materials

精密工学専攻 40号 久道 樹  
Itsuki Hisamichi

### 1. 緒言

現在までに様々な素材や駆動原理を用いたソフトアクチュエータが研究されている。中でも空気圧ゴム人工筋肉は、ゴム等の弾性構造体に空気等の作動流体を注入して動力を得るアクチュエータであり、出力として収縮が得られ、柔軟であるという特徴から人間との協調性の高いアクチュエータとして注目されている。その一つとして軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉<sup>(1)</sup> (以下: SF-ARM)の開発が行われている。これは、従来広く使用されてきた McKibben 型と比較して、高変位、高出力であることが確認されている<sup>(1)</sup>。しかし、SF-ARM は疲労寿命が短く実用化に向けて長寿命化が必要になっている。

本研究では、SF-ARM に使用されているゴム材料に着目し、ゴム材料の単軸引張試験からゴム材料の材料特性を決定し、それを用いて人工筋肉の変形解析を行った。また、ゴム材料の引張疲労試験を行いその疲労寿命を調べるとともに、伸張結晶性のある天然ゴム(NR)と伸張結晶性のないスチレンブタジエンゴム(SBR)の疲労寿命を比較し、伸張結晶化のゴムの疲労寿命への寄与について調べた。最後に、伸張結晶化を用いた SF-ARM の長寿命化の方法について議論している。

### 2. SF-ARM の基礎原理

#### 2.1. 軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉(SF-ARM)

Fig. 1 に SF-ARM の構成と収縮のメカニズムを示す。SF-ARM は内層ゴムチューブを軸方向にひきそろえた補強繊維で覆い、さらにその上を外層ゴムで覆った三層構造となっている。このゴムチューブに空気圧を印加すると補強繊維の拘束により、半径方向にのみ膨張して軸方向には収縮し、大きな収縮力を得ることが出来る。その収縮力をアクチュエータの出力として使用することができる<sup>(1)</sup>。

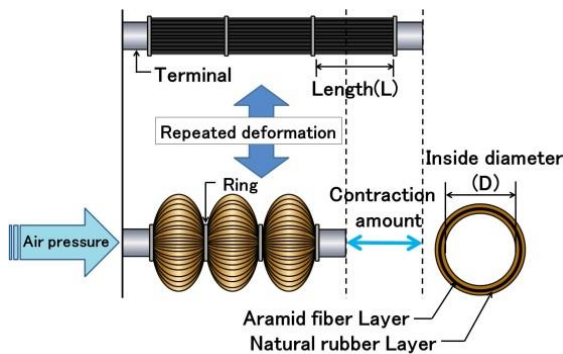


Fig. 1 Deformation behavior of SF-ARM

SF-ARM は McKibben 型と比較して約 4 倍の牽引力、約 1.3 倍の収縮力を持つことが実験により確認されている。しかし、現状では数千回の繰り返し動作で破壊が起こってしまうため、実用化には長寿命化が必要である。

#### 2.2. 天然ゴムの伸張結晶化

ゴムのような高分子材料は、応力集中の原因となる潜在欠陥を有し、外力を受けた際にその欠陥が成長することによりやがてき裂となって材料の破壊を引き起こす。

天然ゴムなどの一部のゴムは伸張により分子鎖が伸張方向に配向し、結晶化する伸張結晶性を持つ。Fig. 2 に伸張結晶化のモデルを示す。図中の四角部は伸張結晶層を模式的に示している。天然ゴムの伸張収縮における結晶化度  $X_c$  (材料に生じた伸張結晶層の度合いを表す) を Fig. 3 に示す。青いプロットは伸張過程、橙のプロットは収縮過程の結果を表す。どちらの過程でもひずみ約 2 以上で伸張結晶化が起こることが分かる。SF-ARM では伸張により結晶層がき裂と直交する方向に形成される。この結晶層がき裂の成長を阻害するため、結晶化が起こる歪み帯で SF-ARM を使用することで疲労寿命を延ばすことができると考える<sup>(2)</sup>。

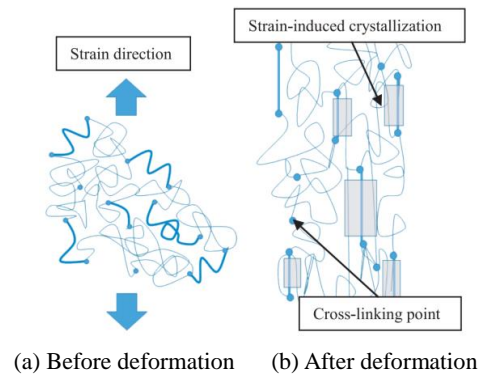


Fig. 2 Crystallization model of NR<sup>(3)</sup>

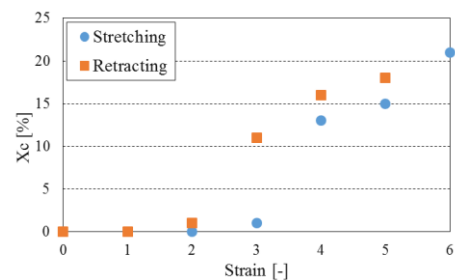


Fig. 3 Relationship between strain and crystallinity<sup>(3)</sup>

### 3. ゴム材料の材料特性決定

ゴム材料をモデル化するために Fig. 4 の試験装置を用いて単軸引張試験を行った。定盤の上にスライダーとロードセルを固定し、スライダーが動くことでチャック間に取り付けられた試験片が伸長する。チャックは試験片を掛けることができるように円筒形になっている。Fig. 5(a)に使用した試験片の形状を示す。幅が 10 mm、厚さが 2 mm の円筒形状になっており、試料は天然ゴムを使用した。Fig. 5(b)に示したように丸棒チャックは直径 4.8 mm、チャック間距離は 25 mm である。引張速度を 10 mm/s で試験片が破断するまで行った。その結果から得られた応力ひずみ線図を Fig. 6 に青い実線で示す。

一般的にゴムのような超弾性を表現する式の一つに Mooney-Rivlin が挙げられ、ひずみエネルギー密度関数  $W$  は式(1)のように表される。ここで式(1)を伸張比で偏微分した上で、非圧縮性と仮定することで伸長比を  $\lambda_1 = \lambda$ ,  $\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda}$  と定義し、式(2)が得られる。

$$W = C_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_{01}\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3\right) \quad (1)$$

$$\sigma = 2\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right)\left(C_{10} + \frac{C_{01}}{\lambda}\right) \quad (2)$$

( $C_{10}$ ,  $C_{01}$  は材料固有の定数)

式(2)を用いて引張試験で得られた応力ひずみ線図のカーブフィッティングを行い  $C_{10}=0.09053$  MPa,  $C_{01}=0.06034$  MPa と定めた。カーブフィッティングの結果を Fig. 6 の赤い破線で示す。ひずみ約 2 までの範囲では、Mooney-Rivlin モデルが実測による応力とひずみの関係を表現できたと言える。

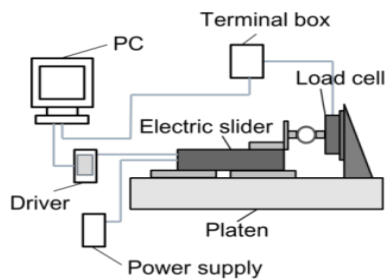


Fig. 4 The uniaxial tensile test equipment

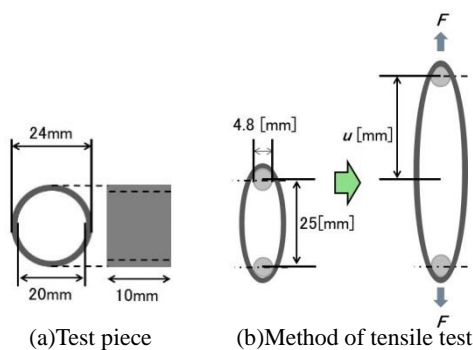


Fig. 5 Uniaxial tensile test of rubber ring

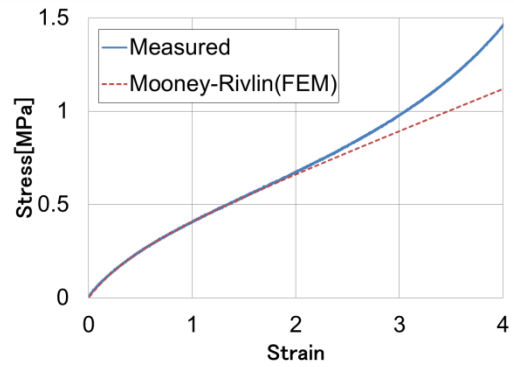


Fig. 6 Stress-strain diagram of rubber material

### 4. SF-ARM の変形解析

内圧を受けた SF-ARM の変形形状や応力に関する妥当性を検証するために、有限要素法によるシミュレーションを行う。Fig. 7 に作成した SF-ARM のモデルを示す。SF-ARM が対称的な変形をするものと仮定して、対称モデルを作成した。内圧によるモデルの変形を Fig. 8 に示す。色分けは第一主応力を表している。また、内圧  $p$  と収縮率  $R=(L-L_0)/L_0 \times 100$  の関係を Fig. 9 に示す。 $L_0$  は変形前の可動部長さ、 $L$  は変形後の可動部長さである。赤いプロットは実測値、青いプロットは解析値を表している。SF-ARM の収縮の立ち上がりに必要な内圧が、実測では約 0.05 MPa、解析では約 0.1 MPa と約 2 倍の差が見られる。しかし、どちらも最終的に収縮率が約 40% に収束しており、解析モデルによって SF-ARM の変形を概ね再現できている。

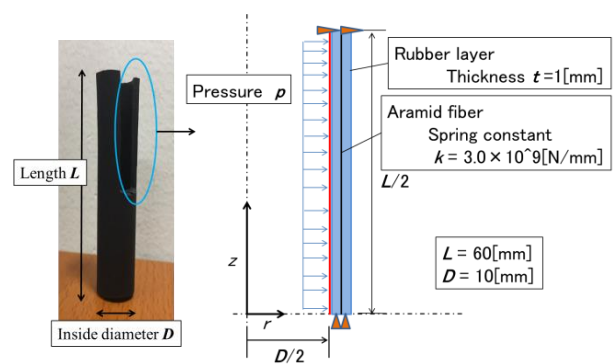


Fig. 7 FEM model of the SF-ARM

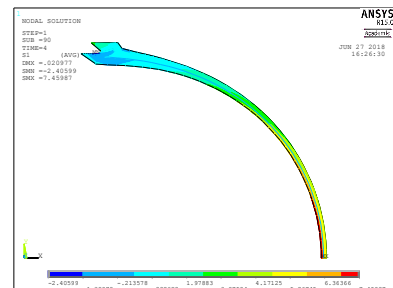


Fig. 8 Deformation due to internal pressure of artificial muscle ( $p = 0.40$  [MPa])

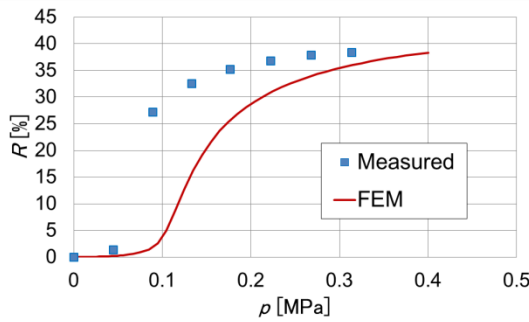


Fig. 9 Relationship between internal pressure  $p$  and contraction ratio  $R$

## 5. 繰り返し引張疲労試験

ゴム材料単体での引張に対する疲労特性を調べるために、Fig. 10 に示す繰り返し引張疲労試験を行う。ゴムが伸張結晶化を起こすようにするためにひずみ0の状態から一度  $a$  [mm] だけ伸張を加え、その状態から試験片が破断するまで  $u$  [mm] の繰り返し伸張を加える。試験装置には Fig. 4 に示した試験機を用いた。また、試験片は単軸引張試験同様円筒形状のものを使用し、試料には伸張結晶性を持つ天然ゴム(NR)と伸張結晶性を持たないスチレンブタジエンゴム(SBR)の2種類を用いる。伸張結晶化が疲労寿命にどのような影響を与えるのかを調べるために  $a$  の値を変えて実験を行う。

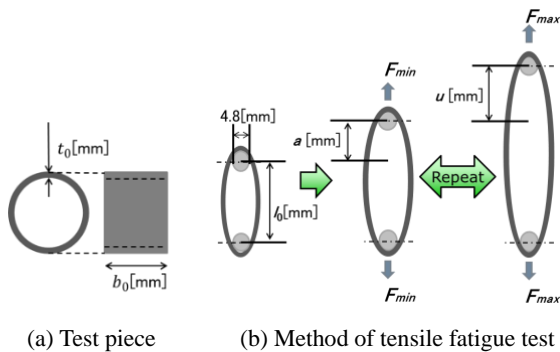


Fig. 10 Repeated tensile fatigue test of rubber ring

Fig. 11 に NR の疲労試験の結果を示す。縦軸は真応力振幅  $\Delta\sigma_T$ ，横軸はゴムが破断するまでの引張回数  $N$  を表している。ここで、試験片の変形後の幅  $b$ ，厚さ  $t$  はそれぞれ式(3)のように表される。また、ゴムが非圧縮性・等方性であると仮定すると、式(4)、式(5)が成り立つ。 $\lambda_i$  は各軸方向への伸張比である。式(3)~(5)より、真応力  $\sigma_T$  は式(6)のように求めることが

$$b = b_0 \lambda_2, \quad t = t_0 \lambda_2 \quad (3)$$

$$\lambda_1 = \frac{l_0 + u}{l_0}, \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{\sqrt{l_0}}{\sqrt{l_0 + u}} \quad (4)$$

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (5)$$

$$\sigma_T = \frac{F}{bt} = \frac{F}{b_0 \lambda_2 t_0 \lambda_2} = \frac{l_0 + u}{b_0 t_0 l_0} F \quad (6)$$

できる。Fig. 11 のプロットはそれぞれ一つの試験片の疲労試験結果に対応し、ラインは  $a$  の値が同じプロットの対数近似曲線である。また、Fig. 12 はそれぞれの  $a$  の値での  $\Delta\sigma_T \doteq 4$  MPa における結果を抽出したものである。縦軸は引張回数  $N$ ，横軸は最小応力  $\sigma_{Tmin}$  を表す。この結果から、NR は最小応力  $\sigma_{Tmin}$  が大きくなるほど疲労寿命が延伸する傾向を持つことが確認できた。同様に、SBR の疲労試験の結果を Fig. 13 に、それぞれの  $a$  の値での  $\Delta\sigma_T \doteq 4$  MPa における結果を抽出したものを Fig. 14 に示す。この結果から、最小応力  $\sigma_{Tmin}$  が大きくなるほど疲労寿命が短くなる傾向を持つことが確認できた。

今回疲労試験を行った2種類のゴムの結果を比較すると、NR は応力を0まで戻しきらずに使用することで疲労寿命を延伸させることが可能であり、これは伸張結晶化の効果であると考えられる。

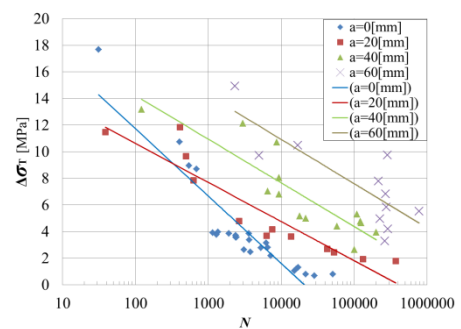


Fig. 11 Result of the tensile fatigue test (NR)

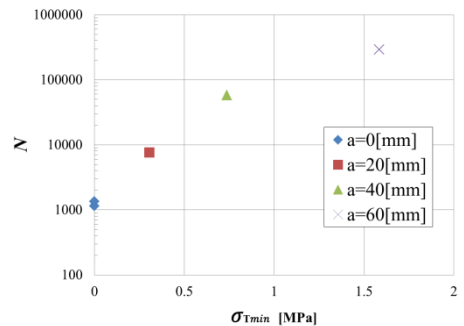


Fig. 12 Relationship between  $N$  and  $\sigma_{Tmin}$  at  $\Delta\sigma_T \doteq 4$  [MPa] (NR)

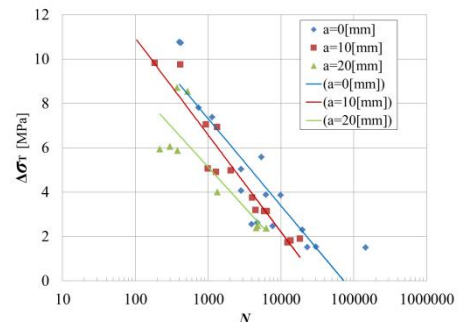


Fig. 13 Result of the tensile fatigue test (SBR)

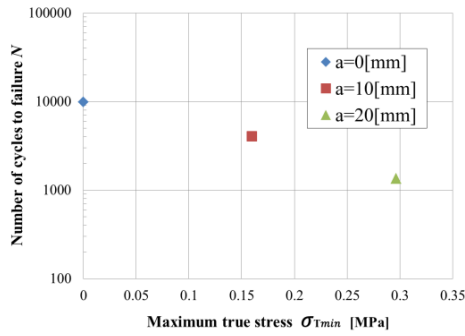


Fig. 14 Relationship between  $N$  and  $\sigma_{Tmin}$  at  $\Delta\sigma_T \doteq 4$  [MPa] (SBR)

## 6. 伸張結晶化を利用したSF-ARMの長寿命化方法に関する検討

### 6.1. 方法

NRに伸張結晶層を生じさせ長寿命化を図るため、SF-ARMに予圧を印加し内圧を0まで戻さないようにして使用方法が挙げられる。しかし、ただそれだけではSF-ARMの出力が低下してしまう。本研究では出力を低下させることなく長寿命化させる方法について検討する。その方法をFig. 15に示す。SF-ARMの使用に際して、元の径よりも大きな径のターミナルを装着し、一定の空気圧を印加して一様な円筒形状とする。その状態を初期状態としてSF-ARMを使用する。

### 6.2. FEM解析

使用する人工筋より大きな径のターミナルを装着した際のSF-ARMの変形や応力分布を確認するためにFEM解析を行う。作成したモデルをFig. 16に示す。ターミナルの装着を表現するために、人工筋肉上部に変位を与え、その後内側から圧力を加えていく。

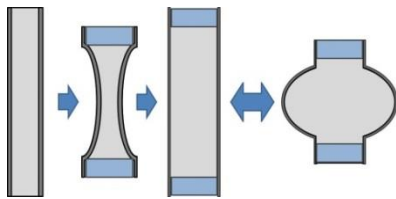


Fig. 15 Method of lifetime extension

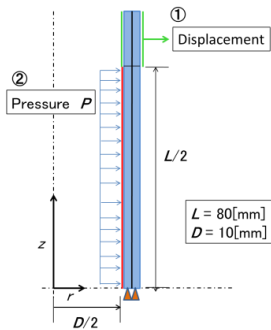


Fig. 16 FEM model of the lifetime extension SF-ARM

解析と実測による内圧と収縮率の関係をFig. 17に示す。青いプロットは実測値を、赤いラインは解析値を表す。SF-ARMが収縮を始める内圧の値に差が見られるが、おおよその挙動を再現していることが確認できた。またこの結果から、大きな径のターミナルを装着した際にも約30%の収縮率を得られることが確認できた。したがって、この方法を用いることでSF-ARMの特徴である大きな収縮量を確保し、かつ既存のSF-ARMをそのまま使用することが可能な上に寿命を延伸させることが出来ると考えられる。

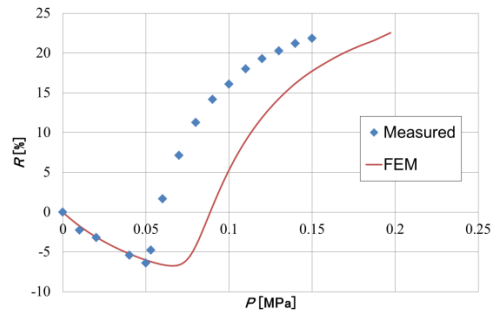


Fig. 17 Relationship between internal pressure  $p$  and contraction ratio  $R$

## 7. 結言

本研究では、SF-ARMの実用化に向けた疲労寿命の延伸を目的とし、ゴム材料の引張に対する特性とSF-ARMの変形解析を行った。以下にまとめを示す。

- 1) SF-ARMの変形解析を行うために、超弾性材料を表すMooney-Rivlinモデルに必要な材料定数を単軸引張試験により求め、変形解析を行いモデルの妥当性を確認した。
- 2) 伸張結晶化がゴムの疲労寿命特性にそのように寄与するのかを調べるために繰り返し単軸引張試験を行い、伸張結晶化によるNRの寿命延伸が確認できた。
- 3) SF-ARMに大きな径のターミナルを装着した際の変形解析を行い、実測との比較を行った。

今後は、解析の精度を上げることを目的としたゴム材料の二軸引張試験、ゴムの引張疲労試験からのSF-ARMの寿命予測等を行っていきたい。

## 参考文献

- (1) 小島 明寛, 奥井 学, 山田 泰之, 中村 太郎, 軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化のための材料とアスペクト比の検討, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.857 (2018), p. 17-00299
- (2) 土岐 重之, ゴムの力学と伸張結晶化, 日本ゴム協会誌, Vol.79, No.10 (2006), p. 472-479
- (3) 小島 明寛, 奥井 学, 久道 樹, 只見 侃朗, 辻 知章, 中村 太郎, 天然ゴムの伸張結晶化を用いた軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉の長寿命化, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.50, No.2 (2019), p. 46-52