

## 6. 研究内容及び成果の本文

### 二重網目構造の天然ゴムを使用した軸方向繊維強化型人工筋肉の開発

中央大学  
研究開発機構  
小島明寛

#### 1. 緒言

ソフトアクチュエータは従来のモータや油圧シリンダなどのアクチュエータと異なり構造的に柔軟さを有しており、身体装着型装置への応用が期待されている。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が、その中でも空気圧ゴム人工筋肉は、既に製品化された例があるなど、その出力密度の高さや安定した動作から、最も実用的なソフトアクチュエータのひとつである。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る。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、身体装着型装置などへの応用研究が盛んに行われている。応募者らが提案した軸方向繊維強化型人工筋肉は、従来の McKibben 型空気圧人工筋肉と比較して同圧力、形状下において 1.5 倍程度の収縮率と 4 倍程度の収縮力を出力できることが実証されており、高出力のソフトアクチュエータである。しかし、本人工筋肉はゴム材料の大変形を伴うため、繰り返し耐久性が低いという問題があった。

本研究では、弛緩状態に異なるひずみ状態を有する 2 つのタイプのネットワークを持つ二重網目構造の天然ゴムを使用した軸方向繊維強化型人工筋肉の開発を行い、長寿命、高出力な人工筋肉の作製を目指した。ここで、一般的な高分子の繰り返し破壊は外力による亀裂の発生、成長を経て起こる。そのため、亀裂の発生、成長を抑制できれば繰り返し耐久性を向上できると考える。そこで、天然ゴムの伸張結晶化に着目した。天然ゴムなどの規則的な分子構造を持つ一部のゴムは架橋した後に伸張することで公称の融点以上でも結晶化するものがある。伸張結晶層は伸張方向と垂直に形成され、繰り返しの伸縮による亀裂の成長を抑制する効果が期待できる。しかし、本特性は可逆的であり、伸張時に形成された結晶層は自然長時には消失すると考えられる。そのため、現状では耐久性試験の伸張時に印加圧力を一部残す(ひずみを全ては緩和しない以下与圧)ことで結晶層を維持し、長寿命化を図っている。ここで、本人工筋肉は自然長時に最も収縮力が大きい。与圧条件で使用することで、長寿命化を図ることができるが、収縮特性が低下するという問題がある。

そこで、本研究では与圧条件を使用せずに伸張結晶層を維持する方法として、異なる 2 つのタイプのネットワークを持つ二重網目構造の人工筋肉の開発を行う。

#### 2. 二重網目構造の天然ゴムの作製

二重網目構造の天然ゴムを以下のプロセスで作製した(図 1)。また、一軸方向への伸張量を 3 水準設定した(表 1)。

- (1) 未架橋ゴムの一部を架橋する ( $\Phi a$  の円柱にゴムを巻き付ける)
- (2) 一次架橋ゴムを作製
- (3) 一次架橋ゴムを一軸方向に伸張する ( $\Phi b$  の円柱に(2)チューブを巻き付ける)
- (4) 一軸方向に伸張した状態で二次架橋をする
- (5) 一軸方向の伸張を緩和する

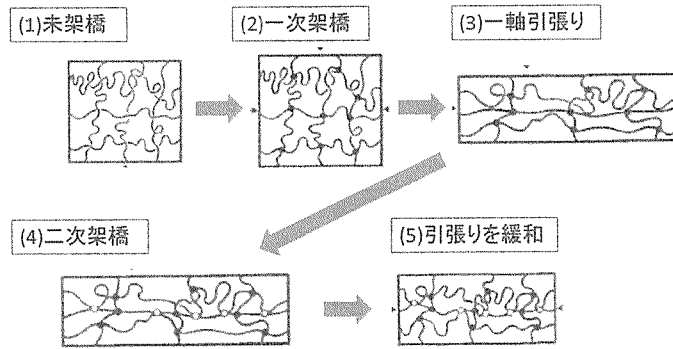


図1 二重網目構造天然ゴムの作製プロセス

表1 二重網目構造天然ゴムサンプル詳細

サンプル	1	2	3	4
$\Phi a$ [mm]	20	20	20	20
$\Phi b$ [mm]	20	25	30	40
伸張率: $b/a$ [-]	1.00	1.25	1.50	2.00

### 3. 二重網目構造の天然ゴムの評価

#### 3.1 物性評価

2章で作製した二重網目構造の天然ゴムの一軸引張り試験から物性評価を行った。試験装置は AUTOGRAPH AGS-J(SHIMADZU 製)を用いて長さ 30 mm, 幅 10 mm, 厚さ 1 mm の短冊状試験片の引張り試験を行った。引張速度は 50 mm/min で行った。試験結果を図2に示す。試験結果から、二重網目の全てのサンプル(2,3,4)で x 方向(架橋時に一軸引張りをした方向)の方が y 方向(同一軸引張なし方向)より伸びが小さかった。

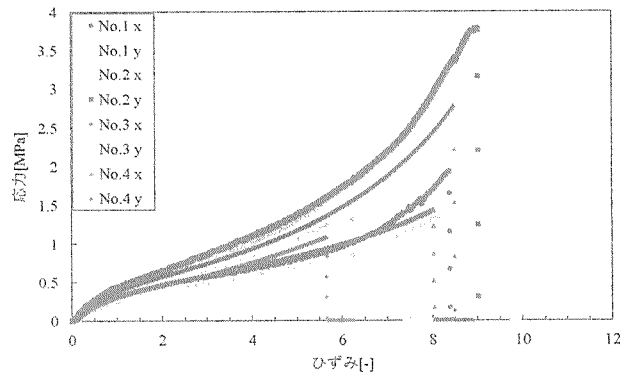


図2 引張り試験結果

### 3.2 広角 X 線回折による結晶層形成の観察

広角 X 線回折により結晶層形成の観察を行った。試験装置は NANO STAR (BRUKER 製) を用いた。X 線源は電圧 45 kV、電流 120 mA で発生させた Cu-K $\alpha$  線を用いた。長さ 30 mm、幅 10 mm、厚さ 1 mm の二重網目構造天然ゴム短冊状試験片 (1 章のサンプル 1 及び 2) を治具で固定し、所定の一軸引張りひずみを与えた状態で X 線散乱の測定を行った。測定箇所を図 3 に測定結果を図 4 に示す。

測定結果から、通常時 (No.1) には結晶層はひずみ 4 (⑤) から観察されるのに対して、二重網目構造の天然ゴム (No.2) ではひずみ 2 (⑦) から結晶層が観察された。これから、二重網目構造とすることで残留ひずみ (応力) が発生して、結晶層を形成しやすくなっていると考えられる。

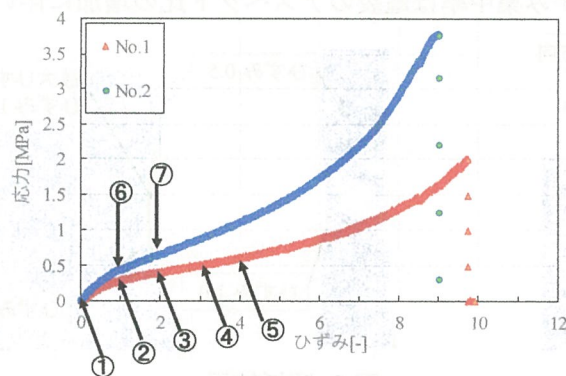
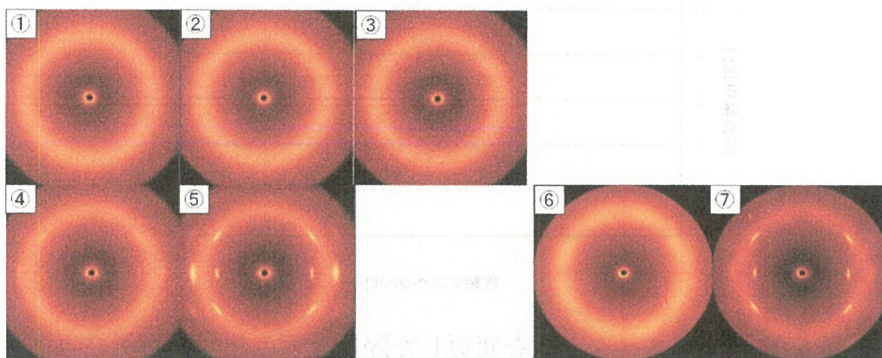


図 3 広角 X 線回折測定箇所



(a) No.1 測定結果

(b) No.2 測定結果

図 4 広角 X 線回折測定結果

### 4. 亀裂近傍でのひずみ集中の確認

3 章から二重網目構造を形成することで、通常より低ひずみの領域から伸張結晶層を形成することを確認した。しかし、実用上ひずみ 2 程度を維持することは困難である。一方、ゴムに亀裂などが発生した場合、その亀裂近傍でひずみ集中が発生し、マクロ的には結晶層が形成されるようなひずみではなくても、ミクロ的には大きなひずみが発生し結晶層が形成されると考える。そこで、本章では有限要素法解析及び広角 X 線回折から亀裂を持ったゴムシートのひずみ集中の確認を行った。

#### 4.1 有限要素法による亀裂近傍のひずみ集中解析

解析ソフトウエアとしてANSYS15.0を用いた。縦50mm、横20mmの平板中央に幅0.01mm、長さ0.01, 0.1, 1, 10mm(アスペクト比1, 10, 100, 1000)と変更したスリットを入れ解析モデルとした。実際の亀裂形状は不明であるが、コムの伸張に伴い、亀裂は長さ方向のみ伸張し、幅方向には伸張しないものとして上記形状とした。これを縦方向に25mm伸張し、亀裂近傍でのひずみ集中の解析を行った。

解析結果を図5に示す。亀裂近傍ではマクロなひずみの数倍のミクロなひずみ集中が確認された。図6に亀裂のアスペクト比を変更した際のひずみ集中率(最大ひずみ/マクロひずみ)を示す。アスペクト比1では亀裂近傍にマクロなひずみの2倍程度のひずみ集中が発生している。このひずみ集中率は亀裂のアスペクト比の増加に伴い増加している。

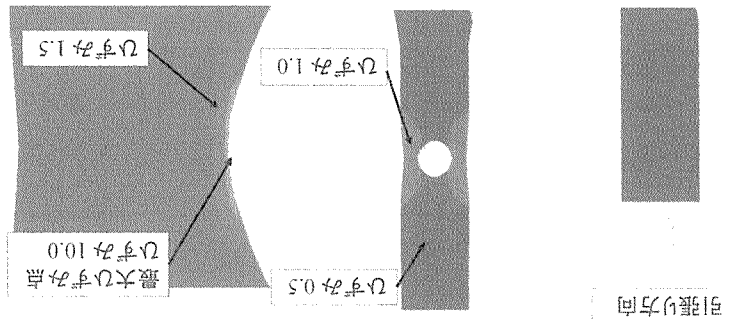


図5 解析結果

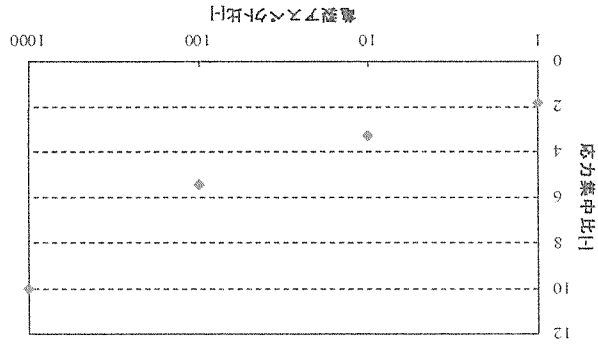
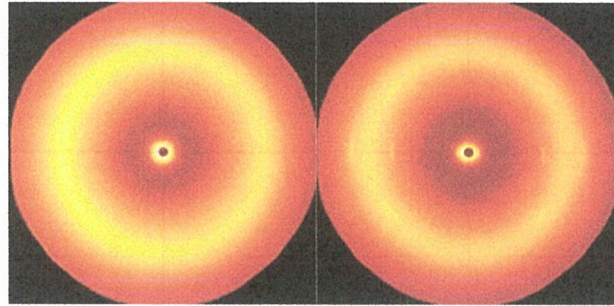


図6 亀裂のアスペクト比を変更した際のひずみ集中率解析結果

#### 4.2 広角X線回折による亀裂近傍のひずみ集中解析

4.1節から、亀裂近傍ではひずみ集中によりマクロなひずみの数倍のミクロなひずみが発生している可能性が示唆された。そのため、本節では広角X線回折から亀裂近傍でのひずみ集中による結晶層形成の確認を行う。

サンプルは幅10mm、厚さ1.0mmのコムシートにΦ2mmの円孔を開けたものとし、円孔から0.5mm離れた位置のX線回折の測定を行った。ひずみ0及びひずみ1での測定結果を図7に示す。図よりひずみ1では結晶層からのピークが観察された。



(a) ひずみ 0

(b) ひずみ 1

図 7 広角 X 線回折測定結果

## 5. まとめ

本研究では、高収縮特性、長寿命な人工筋肉の開発を目指して、二重網目構造の天然ゴムの作製を行った。それにより以下の結果を得た。

- ・二重網目構造の天然ゴムを作製することで残留ひずみを発生させることができた
- ・二重網目構造の天然ゴムでは通常よりも小さいひずみで伸張結晶層の形成を確認した
- ・有限要素法解析から亀裂近傍ではマクロなひずみの数倍となるミクロなひずみ集中を確認した
- ・広角 X 線回折測定から亀裂近傍ではひずみの集中が発生しており、マクロ的には小さなひずみでも結晶層が形成されることを確認した

今後は二重網目構造の天然ゴムを用いた軸方向繊維強化型人工筋肉を作製して、収縮特性及び寿命についての評価を行う。