

中央大学博士論文

Prolonging the lifetime of pneumatic rubber
artificial muscle by strain-induced crystallization

伸張結晶化による空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化

Akihiro Kojima

小島 明寛

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
精密工学専攻

令和元年度

2020年3月

論文目次

第1章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 ソフトアクチュエータ	2
1.2.1 高分子ゲルアクチュエータ	2
1.2.2 導電性高分子アクチュエータ	4
1.2.3 誘電エラストマーアクチュエータ	6
1.2.4 空気圧ゴムアクチュエータ	8
1.3 既存研究	11
1.3.1 空気圧ゴム人工筋肉に関する先行研究	11
1.3.2 アプリケーション	15
1.3.3 人工筋肉の寿命に関する先行研究	22
1.3.4 ゴムの寿命に関する先行研究.....	25
1.4 高分子の破壊	28
1.5 研究目的	30
1.6 論文構成	30
第2章 軸方向繊維強化型人工筋肉.....	32
2.1 収縮メカニズム	32
2.2 収縮特性	33
2.3 作製方法	35
2.3.1 ラテックス式.....	35
2.3.2 固形ゴム式	37
第3章 軸方向繊維強化型人工筋肉の特性と破壊メカニズム	40
3.1 変形解析	40
3.1.1 ゴム材料のモデル化	40

3.1.1.1 ゴム材料のモデル	40
3.1.1.2 ゴム材料の引張試験	43
3.1.1.3 FEM 解析	45
3.1.2 FEM 解析のための人工筋肉モデル	47
3.1.3 FEM による人工筋肉の変形解析	50
3.2 破壊メカニズム	52
3.3 本章まとめ	54
第4章 L/D 比の変更による寿命及び収縮特性への影響評価	56
4.1 有限要素法による変形解析	56
4.1.1 各種 L/D 比と収縮率	56
4.2 ゴム材料の検討	58
4.2.1 ゴム材料の検討	58
4.2.2 物性評価	59
4.2.3 アレニウスの式による経年劣化の予測	62
4.3 L/D 比の変更による寿命評価	64
4.4 L/D 比の変更による収縮特性評価	67
4.4.1 実験条件及びサンプル	67
4.4.2 収縮力	69
4.4.3 収縮率	71
4.5 本章のまとめ	73
第5章 与圧印加による長寿命化	75
5.1 天然ゴムの伸張結晶化	75
5.1.1 天然ゴムの伸張結晶化	75
5.1.2 伸張結晶層による亀裂伸展の阻害	77
5.1.3 広角 X 線回折による伸張結晶層の測定	78
5.1.3.1 天然ゴムの応力ひずみ特性	78
5.1.3.2 広角 X 線回折測定	79

5.2 有限要素法解析.....	88
5.2.1 亀裂近傍のひずみ集中解析.....	88
5.2.2 人工筋肉の収縮率とひずみ解析.....	92
5.3 与圧印加による寿命評価.....	94
5.3.1 与圧印加による材料単体の繰返し引張り試験.....	94
5.3.2 与圧印加による人工筋肉の寿命評価.....	99
5.4 与圧印加による収縮特性評価.....	102
5.5 本章まとめ.....	104
第6章 長寿命かつ高出力を目指したくびれ型人工筋肉の提案.....	106
6.1 概要.....	106
6.2 寿命評価.....	108
6.3 収縮特性評価.....	111
6.3.1 収縮率測定.....	111
6.3.2 収縮力測定.....	114
6.4 本章まとめ.....	116
第7章 結論と今後の展望.....	118
7.1 結論.....	118
7.2 今後の展望.....	119
参考文献.....	120
研究業績.....	125
謝辞.....	128

第 1 章 緒論

第1章 緒論

1.1 研究背景

近年の少子高齢化により労働人口が減少して、労働者一人当たりの負担が増大している。厚生労働省[1]によると、団塊の世代が60歳に達した2007年以降、労働人口は減少傾向にある。また、高齢者の生活支援そのものに必要な労働力も、2013年には171万人、2025年には253万人に達すると想定されている[2]。

労働力不足に対するアプローチとして、労働効率の改善がある。現在、労働の自動化・機械化による効率改善が盛んに行われている。しかし、農業[3]・製造業[4]・介護[5][6]の分野は、作業効率やスペース不足等の理由から自動化・機械化が困難な作業が存在[7]し、労働力不足により一人当たりの作業量が増加している。そのため、労働負荷の軽減及び労働効率の改善のために身体装着型アシスト装置の研究開発が盛んに行われている。従来のモータやシリンダのようなアクチュエータは重厚長大で剛性が高く、大きな力を出力するなど人間ができない作業を実現するのが主な役割であった。しかし、上記の身体装着型アシスト装置では、柔軟、軽量、小型といったような人間親和性の高いアクチュエータが求められている。

近年では人間親和性の高いアクチュエータとしてソフトアクチュエータの研究開発が盛んに行われている。ソフトアクチュエータとは、軽量で柔軟な材料が変形することによりアクチュエータとして機能するデバイスのことである。ソフトアクチュエータは駆動原理などにより様々なタイプが開発されているが[8][9][10][11]、その中でも空気圧ゴム人工筋肉は、すでに製品化された例がある[12][13][14]など、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一つである。空気圧ゴム人工筋肉は、ゴムなど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。

その中で中村らは、高出力、高変位な空気圧ゴム人工筋肉として、軸方向繊維強化型人工筋肉を開発した[15][16]。本人工筋肉は原理的にゴムの大变形を利用しており、収縮特性に優れる一方で疲労寿命が短く、実用化に向けた課題となっていた。

本研究ではこのような背景から、収縮特性に優れた軸方向繊維強化型人工筋肉の実用化に向けて、長寿命化に取り組む。

1.2 ソフトアクチュエータ

本節では、既存の代表的なソフトアクチュエータを紹介し、その特徴について論じる。ソフトアクチュエータは構造の違いで分類すると、高分子ゲルアクチュエータ、導電性高分子アクチュエータ、エラストマーアクチュエータ、空気圧ゴムアクチュエータなどが挙げられる。

1.2.1 高分子ゲルアクチュエータ

高分子ゲルアクチュエータは高分子の 3 次元網目構造体に水や有機溶媒などを含むゲルの体積が pH, 熱, 糖や抗原などの特定溶質, 光, 磁場, 電場などの外部刺激などにより変化する現象を駆動力としている。光により駆動する高分子ゲルアクチュエータはアゾベンゼンのような光に応答して **trans** 体から **cis** 体へ構造を変化させる分子を使用しており, その物性に関する様々な研究が行われている。細野らは, アゾベンゼンの光異性化による構造変化を直接ゲルの変形に結び付けた光応答性ジャングルジム型高分子ゲルを開発し, デバイスへの応用などを行っている[17]。磁場応答性ゲルアクチュエータは, 架橋された高分子の 3 次元網目構造中に溶媒が保持されており, さらにその中に磁性流体が分散されている。これに磁場を印加することで磁性流体が応答して, アクチュエータとしては伸縮などの運動をする。三俣らは, 酸化鉄を分散させたカラギーナンゲルの貯蔵弾性率とひずみの関係性について検討を行っている[18]。電場応答性ゲルアクチュエータは電気に反応して変形が生じるアクチュエータであり, 数%程度のひずみを発生するため, 応用が期待されている。イオン伝導性高分子であるフッ素系高分子電解質膜は電気駆動型アクチュエータ材料であり, 表面に金または白金を化学めっきした IPMC(ionic polymer metal composite)に含水状態で 0.5~3 V 印加すると, 膜中の対イオンが水を伴ってカソード側に移動してアノード側に屈曲する(図 1.1)[19]。安積らは, イオン液体を含んだフッ素系高分子ゲルを, イオン液体とカーボンナノチューブからなるバッキーゲル電極で挟むことにより三層アクチュエータを作製している[20]。

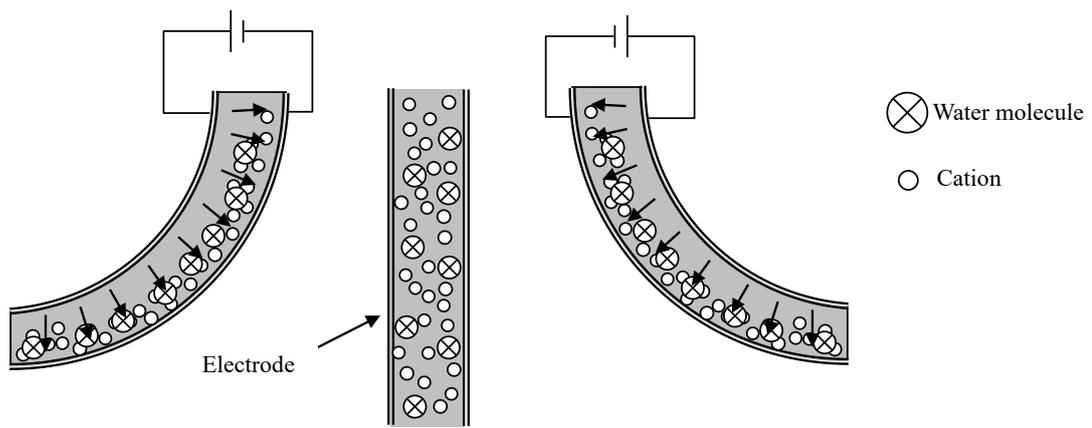


Fig. 1.1 IPMC actuator[19]

1.2.2 導電性高分子アクチュエータ

ポリピロール(PPY), ポリチオフェン, ポリアニリン(PANI)及びその誘導体に代表される導電性高分子は酸化によって電導度が絶縁体から金属状態へ変化するポリマーである。ポリマーとしても強靱性と導電性により酸化還元が可逆的に制御可能であることから, 電解コンデンサ, 二次電池の電極材料などとして実用化が行われている。電気化学的な酸化によって電解液中のイオンが高分子内に取り込まれて, 体積が増加し, 還元されることにより元の体積に戻るという可逆的な膨潤, 収縮が起こる。このようなメカニズムで起こる変形を電解伸縮(ECMD)と呼び, ソフトアクチュエータ材料として研究が行われている(図1.2)[21].

金藤らは電解重合により作製した PPY フィルムが 12.4 %の伸縮率と 22 MPa の発生応力を示すことを明らかにし, ダイアフラムポンプや触覚ディスプレイへの応用について検討している[22]. エネルギー変換効率は 0.3 %以下と低いが, 電気化学的酸化還元が二次電池の充放電に相当することから, 入力エネルギーのほとんどは回収可能である。奥崎らは, 電解重合により合成した PPY フィルムが湿度変化に応答して空気中で高速変形する現象を見出し, 直接回転運動する高分子モータを試作している。PPY やポリ 4-スチレンスルホン酸をドーピングしたポリ 3,4-エチレンジオキシチオフェン(PEDOT/PSS)フィルムに数 V 印加することにより空気中で収縮することを見出している[23].

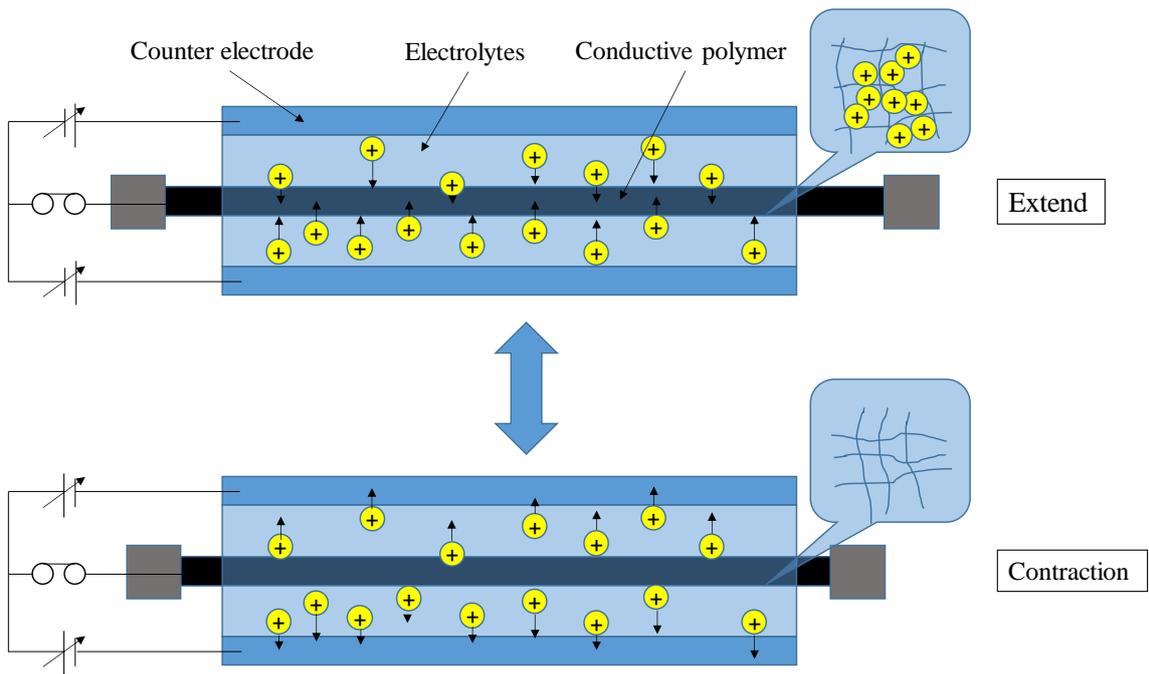


Fig. 1.2 Conducting polymer actuator[24]

1.2.3 誘電エラストマーアクチュエータ

誘電エラストマーアクチュエータ(DEA:dielectric elastomer actuator)は電圧駆動型アクチュエータであり、ファラデー電流がほとんど流れないことから高いエネルギー効率と優れた耐久性が期待されている。DE エラストマーは主材料であるポリマー膜と、それを挟む2枚の電極で構成されている。平井らは、ソフトセグメントとハードセグメントを様々な成分で構成しポリウレタンエラストマーのひずみ特性について報告している[25]。Pelrine らはシリコンやアクリルエラストマーシートの両面にカーボンや銀グリースを塗布したDEAアクチュエータを開発している(図 1.3)[26]。電圧印加により電極間に静電引力がはたらき、エラストマーが圧縮変形することで、垂直方向に大きく伸長する。構造が単純でエラストマー材料の汎用性も高いが、駆動電圧が高い、伸縮性電極に限られる、予ひずみが必要等の課題がある。Lehmann らは強誘電液晶エラストマーアクチュエータを開発し[27]、1.5 MV/m の低電場で4%変形することを報告している。

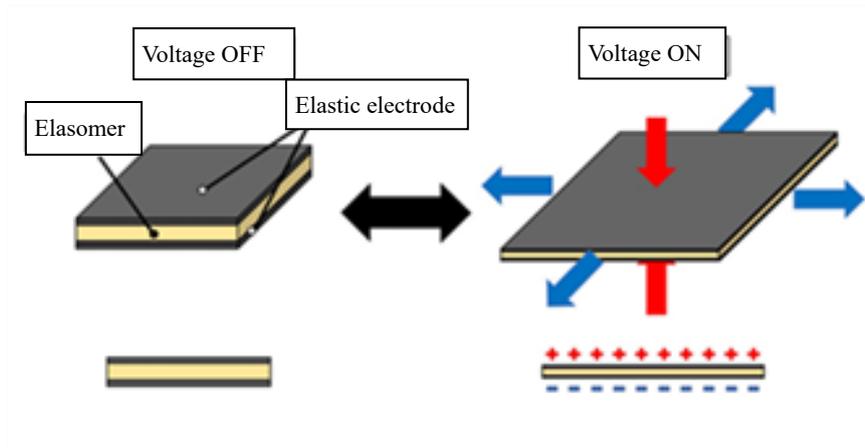


Fig. 1.3 Dielectric elastomer actuator[26]

1.2.4 空気圧ゴムアクチュエータ

空気圧ゴムアクチュエータ(人工筋肉)は、ゴムのような弾性媒体材に空気等の流体を注入して動力を得るアクチュエータの一つである。通常、風船のような膨張体は内部に空気圧を印加すると、パスカルの原理より四方八方に膨張する。しかし、この膨張体に繊維を複合させることで、ある特定の方向に膨張が偏り、その繊維の形状変化に伴う伸長及び収縮力が発生する(図 1.4)。このアクチュエータは、一般のモータや油圧、空気圧機器のアクチュエータと比較して、軽量で出力密度が高い、柔軟性があり、人間の筋特性と同様の特性を持つ、などの特徴を持つ。空気圧ゴムアクチュエータの中で一般的なものとして **McKibben** 型人工筋肉が挙げられる。**McKibben** 型人工筋肉は、1957 年に **Joseph McKibben** により、四肢疾患のリハビリテーションや装具用のアクチュエータとして開発された。**McKibben** 型人工筋肉は伸縮性のないポリエステルモノフィラメント製の繊維コードを格子状に編んだスリーブでゴムチューブを覆い、スリーブの両端を固定した構造となっている。ゴムチューブに空気圧を印加することでチューブは半径方向に膨張して、繊維コードを押し広げる。その際に繊維コードの編み込み角度が変化して軸方向の収縮力が発生する。

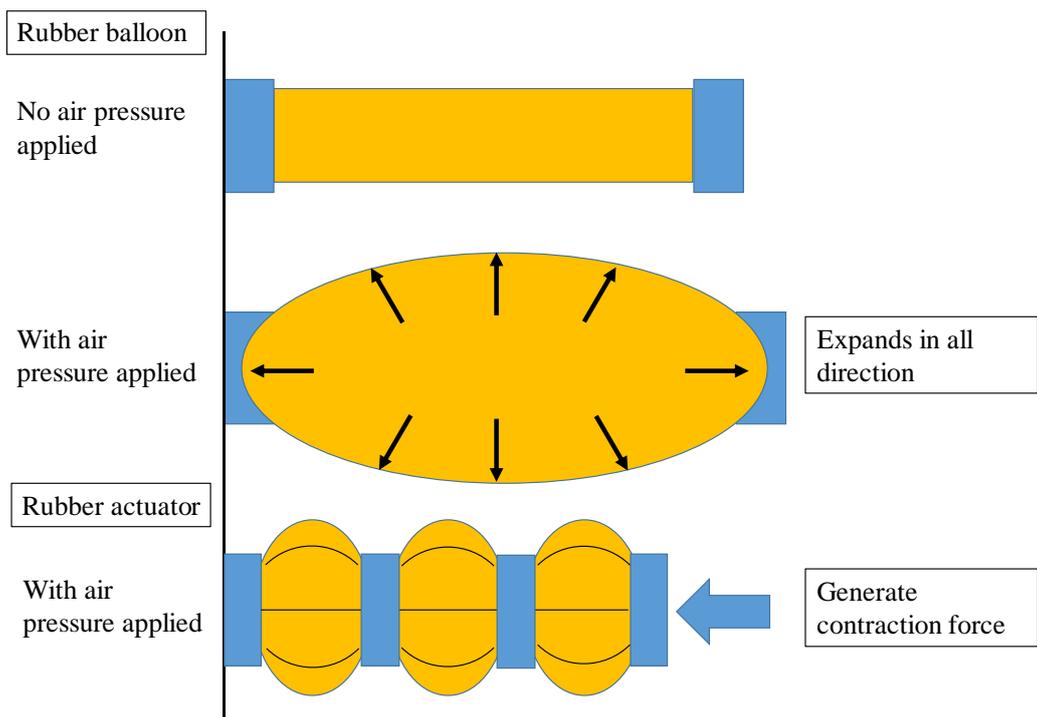


Fig. 1.4 Pneumatic rubber artificial muscle[28]

代表的なソフトアクチュエータのまとめを表 1.1 に示す. 様々なソフトアクチュエータの中から出力, 変位の大きさ, 安定した動作などから最も実用的なものである空気圧ゴム人工筋肉に着目した.

Table 1.1 Soft actuator classification

Material	Driving force	Output	Displacement	Characteristic
Conductive polymer	Electrical	~10 N	~10 %	Low voltage drive, low response
Dielectric elastomer	Electrical	~10 N	~10 %	High response, high drive voltage
Polymer gel	Light, heat, etc.	~10 N	~10 %	Low response
Rubber	Pneumatic, hydraulic	~2000 N	~40 %	High output, high displacement

1.3 既存研究

1.3.1 空気圧ゴム人工筋肉に関する先行研究

1.3.1.1 軸方向繊維強化型人工筋肉

図1.5に軸方向繊維強化型人工筋肉の構造を示す。軸方向繊維強化型人工筋肉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構造となっている。人工筋肉のゴム材料としては、低圧で駆動できるよう柔軟で伸びが大きい天然ゴム(NR)が使用されている。また、油圧駆動であれば耐油性のニトリルブタジエンゴム(NBR)が用いられるなど、用途に応じたゴム材料の選択が可能となっている。

補強繊維としては、高張力、耐熱性、寸法安定性、耐薬品性などの特性を持つアラミド繊維やカーボン繊維が使用されている。チューブにリングを挿入することで稼働部長さを制限して、膨張形状をコントロールしている。また、端部のリングは変形時にゴムと固定部の接触を避けるために挿入している。

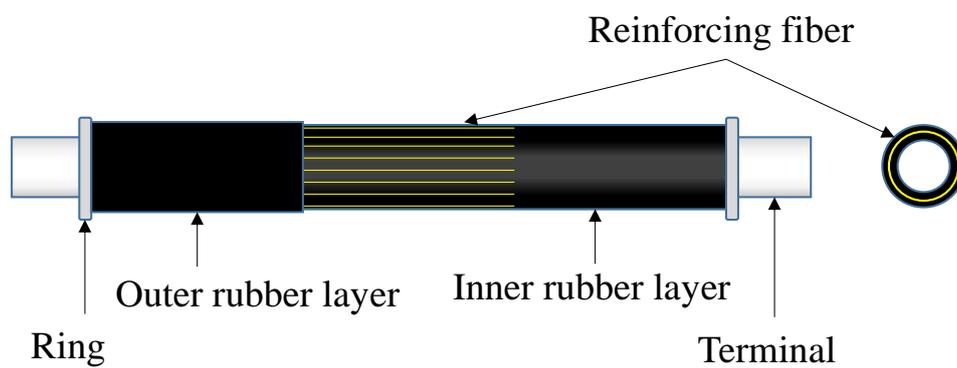


Fig. 1.5 Structure of the straight-fiber-type artificial muscle

1.3.1.2 McKibben 型人工筋肉

McKibben 型人工筋肉は、ゴムチューブを繊維コードで覆った構造となっている(図 1.6)。このゴムチューブに空気圧を印加することでゴムチューブが膨張して、繊維コードを押し広げる。その際、繊維コードの編み込み角度が変わり、軸方向への収縮を発生させる(図 1.7)。空気圧印加によるゴムチューブの膨張力を繊維コードの拘束が軸方向への収縮力に変換する。McKibben 型人工筋肉の収縮率は最大で 25%程度[29][30]であり一般的な人間の筋肉の収縮率約 30%[31]と比較して小さい。また、ゴムチューブと繊維コードの摩擦により破壊が発生する。



Fig. 1.6 McKibben type artificial muscle

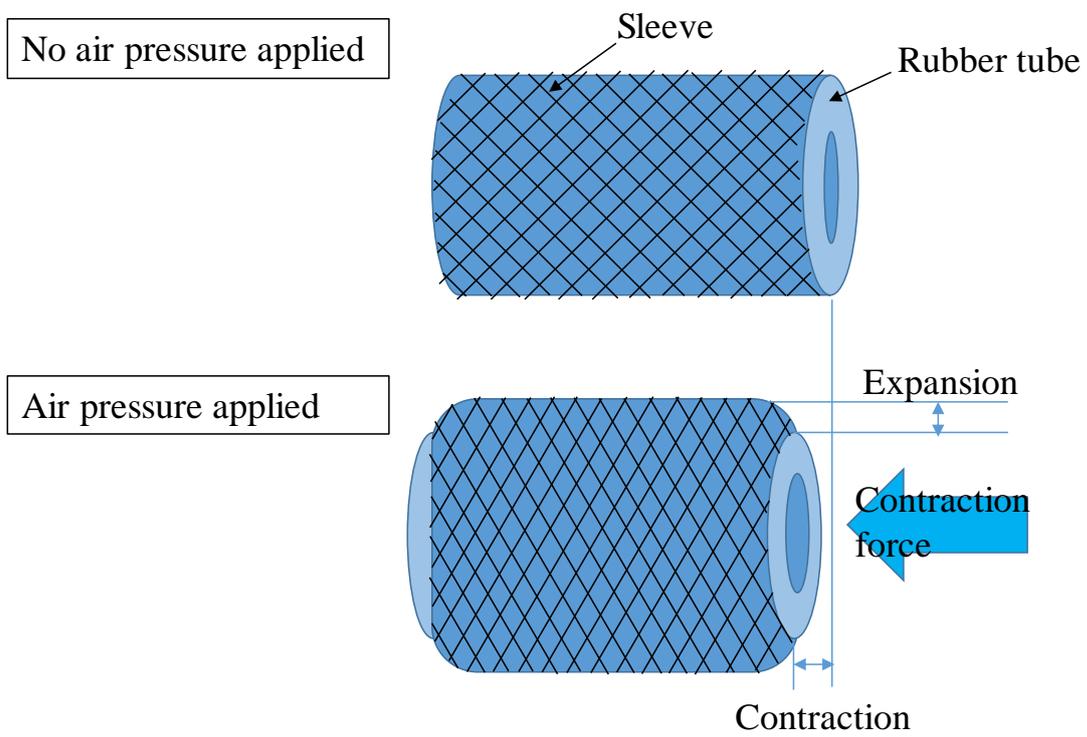


Fig. 1.7 Contraction mechanism of McKibben type artificial muscle

1.3.2 アプリケーション

本項では軸方向繊維強化型人工筋肉のアプリケーションについて述べる。本人工筋肉は空気圧を印加することで収縮力を得るといった一般的なアクチュエータとしての用途の他にも、半径方向に膨張し軸方向に収縮する特性を利用し、ぜん動運動を模擬したロボットへの応用が検討されている。

1.3.2.1 身体装着型アシスト装置

高齢化社会では人口に対する労働力の不足が問題となっている。厚生労働省[1]によると、団塊の世代が60歳に達した2007年以降、労働人口は減少傾向にある。労働力不足に対するアプローチとして、労働効率の改善があり、労働の自動化、機械化による効率改善が盛んに行われている。しかし、農業[3]、製造業[4]、介護[5][6]などの分野では、作業効率やスペース不足等の理由から自動化、機械化が困難な作業が存在し、労働力不足により一人当たりの作業量が増加している。そのため、高齢者の生活支援や重労働者の負担軽減を目的とした身体装着型アシスト装置の開発を行っている。

図1.8に既存の身体装着型アシスト装置を「内骨格-外骨格」と「アクチュエータ特性」の2つのパラメータで分類したチャートを示す[32]。アクチュエータ特性については、右がモータや油圧シリンダを代表とする高剛性アクチュエータ、左がアクチュエータを用いない非アクチュエータ、中間が柔軟なソフトアクチュエータを表す。チャート右側に位置する高剛性アクチュエータを用いたアシスト装置では、大きなアシスト力を発揮できる一方で非動作時のバックドライバビリティが低く装着者の動きを阻害するという欠点がある。チャート左側に位置する非アクチュエータのアシスト装置では、軽量、高いバックドライバビリティ等の長所があるが、アシスト力が小さいという課題がある。

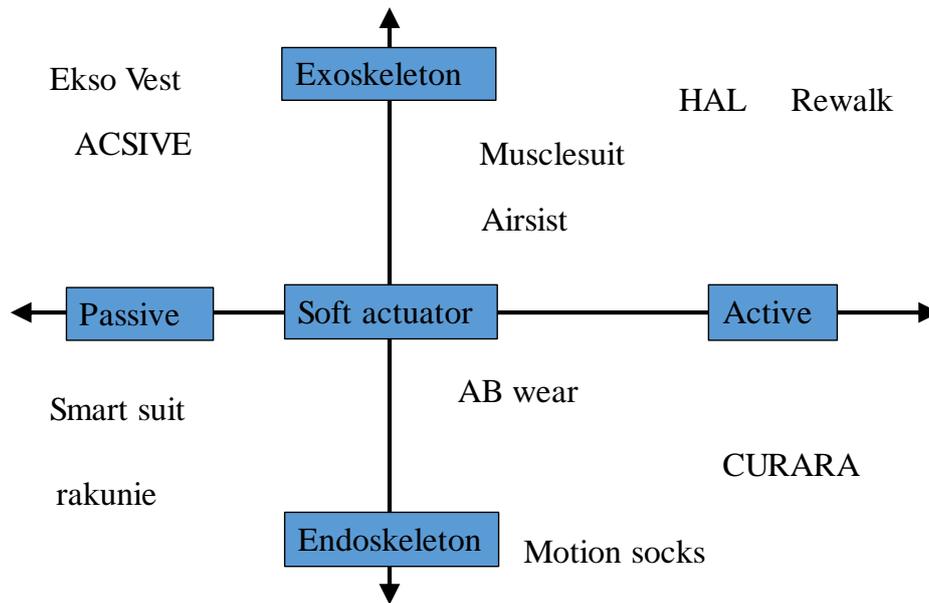


Fig. 1.8 Chart of wearable assistive system[32]

そこでアクチュエータの粘弾性を構造的に可変とすることで、これらの領域を横断的にカバーし、それぞれの領域の長所を併せ持ったアクチュエーションシステムの開発を目指している[33][34].

ここで、人間の関節は骨と骨の間に配置された筋肉が、拮抗しながら収縮して動作している。この構造により、人間は角度やトルクだけでなく、関節の弾性や粘性を構造的に変化させながら駆動することができる。この可変粘弾性の特性から、人間の関節はモータ駆動の場合とは逆に、本来構造的に柔らかく低慣性なものを、必要に応じて高剛性に変化させている。人間の関節と同じ駆動原理を持つ関節系を身体と並列に配置すれば、モータを用いた既存手法よりも人体親和性の高いアシストが可能であると考えられる。

開発しているアシスト装具(図 1.9)ではアクチュエータとして、軸方向繊維強化型人工筋肉を使用している。本人工筋肉を身体装着型アシスト機器に適用することで以下の利点を得ることができる。

- 軽量で高出力であるため、駆動部のモビリティが高く小型化が可能となる。また、McKibben型人工筋肉と比較して低圧で同程度の出力が得られるため、コンプレッサ等の空気圧源を小型化できる可能性が高い
- 構造的に柔軟性を有しており、広域にわたる剛性の制御がオープンループで可能。これからインピーダンス制御等が必要となる減速器付きのモータと比較して、応答性やバックドライバビリティの面で優れており、本質的に安全。
- 形状自体が柔軟に変形するため、身体に装着しやすい。内骨格や外骨格等のウェアラブル機器の設計思想に制限を与えない。
- 部品点数が少なく原料が安価であるため、消耗品として大量生産が可能。

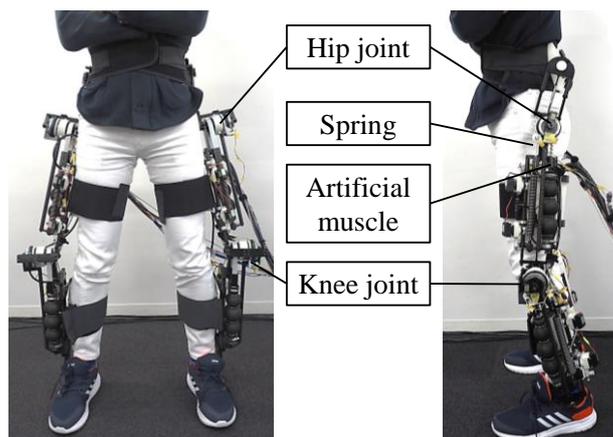


Fig. 1.9 Assist device Airsist[35]

1.3.2.2 ミミズの移動方式を模擬したインフラ点検ロボット

下水管やガス管といったインフラの点検は、工業用内視鏡や車輪式自走ロボットなどを用いて行われている。しかし、曲がりや分岐などの複雑な管路や長距離管に対して既存の手法では検査を行うことが困難となっている。そこで、ミミズのぜん動運動に着目し、ぜん動運動を模倣したロボットの開発を行っている。ミミズの体は約 150 に分けられた体節からなる。体には縦走筋と管状筋という 2 つの筋肉があり、これを使って体節を「細く長く」「太く短く」することができる(図 1.10)。ミミズがぜん動運動により前進する様子を図 1.11 に示す。まず、ミミズは頭部の体節を収縮させる。その際に収縮した体節は地面に接触し、摩擦によってその場にとどめられる。この収縮を後方の体節へと伝播させながら前方の体節を伸長させていく。体節が収縮する際には後方の体節を前方に引張り、体節が伸長する際には前方の体節を前方に押し出している。この収縮と伸長の繰返しにより縦波後進波が発生し、ミミズは前進することができる[36]。

このぜん動運動による移動には以下の特徴がある。

- ① 移動に必要な空間が他の移動手段に比べて小さい
- ② 周辺環境に対して接地面積を大きく確保することができるため、安定的な移動と大きな牽引力が得られる
- ③ ミミズの内部は食道になっており空洞である。したがってその空洞部に既存のカメラやメンテナンス装具等を出し入れすることが可能となる

以上の特徴から、この運動様式を利用したロボットを開発することで、他のロボット機構では入り込めない細管内での移動が期待できる[37]。

図 1.12 に開発しているぜん動運動型ミミズロボット PEW-RO を示す[38]。人工筋肉の「細く長く」「太く短く」変形する特性を利用してミミズのぜん動運動を再現している。本ロボットは長距離圧送管の検査はじめ 25 A や 15 A 管といった細い管の検査への適用を検討している。また、ロボットの周辺にナイロン毛を設置することで、空気ダクトの清掃を行うことにも成功している。

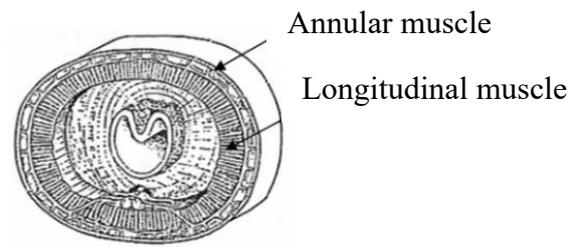


Fig. 1.10 Earthworm body

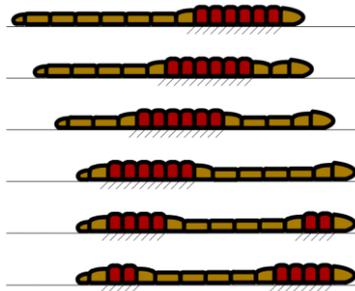


Fig. 1.11 Earthworm peristalsis[44]



Fig. 1.12 Earthworm type robot PEW-RO[46]

1.3.2.3 腸の運動を規範とした混合搬送ポンプ

固液混合流体や高粘性流体は、最終製品や中間材料として、食品、医薬品、建設など様々な分野で利用されており、効率的な混合搬送技術が求められている。代表的な技術であるスクリーコンベアやプラネタリミキサは、搬送物に摩擦やせん断力がかかる上に、混合と搬送が別装置で行われるためバッチプロセスとなる場合が多い。そのため、低せん断力かつ混合搬送を連続化可能な混合搬送技術が求められている。

そこで、腸管の動きに着目し、混合搬送可能なポンプを開発している[39][40]。腸管はミミズとは異なるぜん動運動により食塊を送り出している。腸管は、径方向に収縮する環状筋と軸方向に収縮する縦走筋の 2 つの筋肉の連動により運動を発生している(図 1.13)。この 2 つの筋肉を使用して腸の閉塞部分を作り出し、腸内の食塊を混合搬送している(図 1.14)。

人工筋肉とゴムチューブを用いた二重円筒構造で腸管の構造を再現している。これに空気圧を印加することで各ユニットは人工筋肉により軸方向に収縮し、ゴムチューブは内側に膨張する。この腸管を模擬した構造を連結することでぜん動運動型混合搬送機を実現した(図 1.15)。各ユニットが閉塞する際に、材料を管内面全体で揉み解すように押し出すため、低せん断力で摩擦も発生しにくい。高出力な人工筋肉を用いることで、低エネルギーでの混合搬送を実現している。

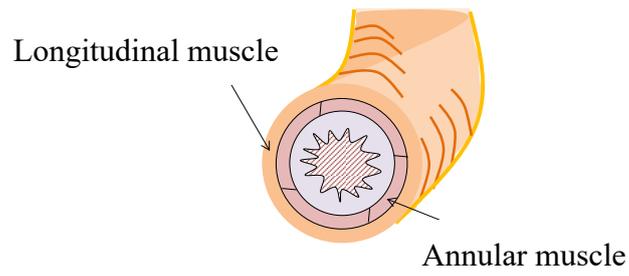


Fig. 1.13 Intestinal structure[40]

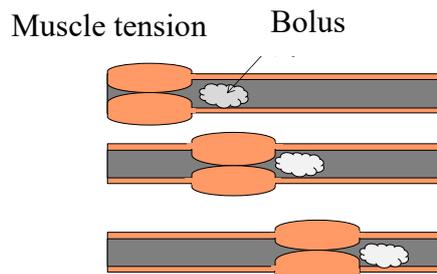
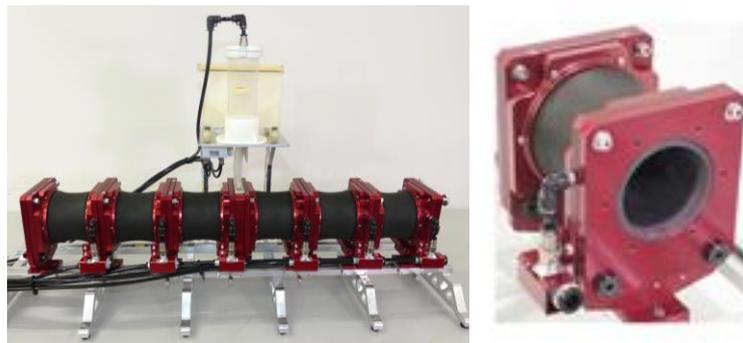
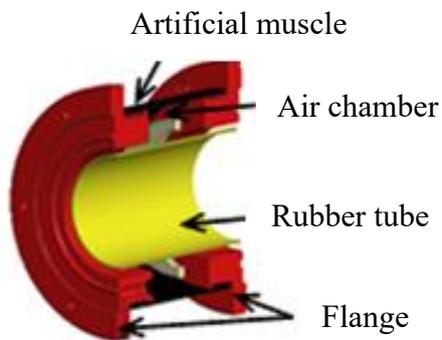


Fig. 1.14 Intestinal movement[39]



(a) Peristaltic pump

(b) Pump unit



(c) Cross section View

Fig. 1.15 Peristaltic pump[40]

1.3.3 人工筋肉の寿命に関する先行研究

McKibben 型人工筋肉の寿命に関する研究として, Klute らは, 天然ゴム及びシリコーンゴムで作製した McKibben 型人工筋肉の収縮量を変更した際の疲労寿命試験を行い, 天然ゴム製はシリコーン製の 24 倍の寿命であることを示している(表 1.2). また, 疲労寿命はアクチュエータの収縮に依存し, 収縮率 25%と収縮率 5%では寿命が 4 倍程度異なることを示している[41].

Table 1.2 Fatigue life for McKibben actuators fabricated with silicone or latex rubber bladders tabulated by the amount of actuator contraction[41]

Actuator contraction λ	Typical pressure [bar]	Silicone rubber N [cycles]	Latex rubber N [cycles]
0.75	3.6	180	4320
0.80	3.0	480	6140
0.85	2.3	1290	8730
0.90	1.6	3490	12400
0.95	0.9	9440	17620

冬木は、McKibben 型人工筋肉の駆動源である弾性体チューブの外周表面に耐摩耗用の静電植毛層を設けることによりスリーブとチューブの摩擦による破損を防止して、耐久性を 20 倍に向上させている(図 1.16, 表 1.3)[42].



Fig. 1.16 Inner elastomer tube of McKibben pneumatic artificial muscle[42]

Table 1.3 Result of endurance test[42]

No.	Electrostatic flocking	Endurance test	Damage situation
1	×	32,000	Air leak from pinhole
2		37,000	
3		44,000	
4	○	1,000,000 ≦	No damage
5		1,000,000 ≦	
6		1,000,000 ≦	

戸森らは、軸方向繊維強化型人工筋肉の寿命について、補強繊維に着目して、炭素繊維とアラミド繊維を使用した人工筋肉を作製して、疲労寿命の試験を行った。その結果、アラミド繊維では繊維の破壊が発生せず、炭素繊維と比較して3倍程度の寿命の向上を行っている(図 1.17, 1.18)[43]。また、リングの厚みと疲労寿命に関する検討も行っている。

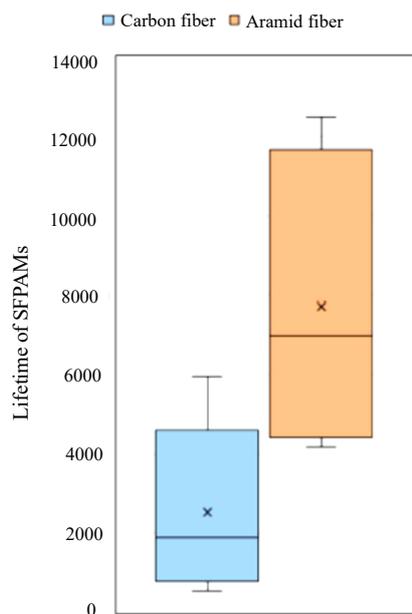


Fig. 1.17 Results of endurance tests (Difference in fibers)[43]



Fig. 1.18 SFPAM (with CB fiber and aramid fiber)[43]

1.3.4 ゴムの寿命に関する先行研究

本節ではゴムの寿命に関する既存の研究について記載する。藤本らは、一定応力下での繰返し破壊過程を明らかにするために、SBR を用いて疲労破壊寿命の検討を行っている。その結果、繰返し応力条件により 3 つの領域に大別できることを明らかにしている(図 1.19)[44]。領域 I は繰返し応力が大きい場合に相当し、単純伸長破壊と同様、破壊分子鎖集団の生長、破壊が繰返し破壊過程を支配している。領域 II は繰返し応力が中程度の場合に相当し、領域 I と同様に破壊分子鎖集団の生長、破壊が繰返し破壊過程を支配しているが、単純伸長破壊の場合に比べて、大きな破壊分子鎖集団の破壊エネルギーを必要とする。領域 III は繰返し応力が小さい場合に相当し、局所的な破壊先端部からのクラックの成長が繰返し破壊過程を支配している。

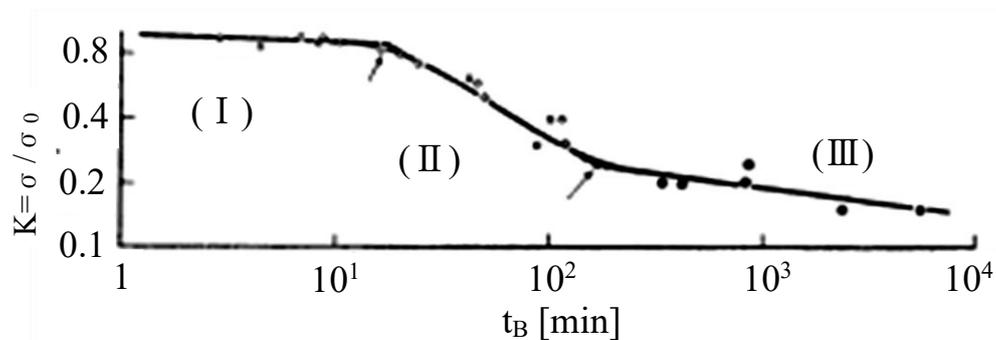


Fig. 1.19 Fatigue life curve[44]

深堀は、NR のひずみを変更した際の材料破断までの繰返し回数をプロットして S-N 曲線を作成している(図 1.20)[45]。また、破断に至るまでの繰返し数 N を式(1.1)で予測している。

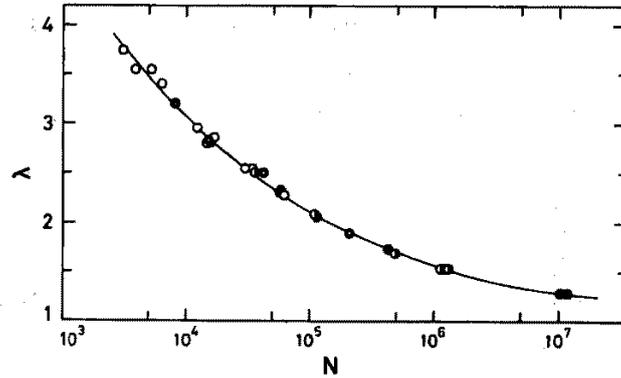


Fig. 1.20 S-N curve of NR[45]

$$N = \frac{G}{(\beta - 1)(2k(\lambda)W)^\beta} \times \frac{1}{C_0^{\beta-1}} \quad (1.1)$$

ここで、 G と β は傷の成長に関する材料定数であり、 $k(\lambda)$ は λ とともに減少する関数である。 W は傷の成長を開始させるのに要するひずみエネルギー密度である。また、 C_0 は潜在欠陥である。

また、池田は、シンクロトロン X 線による NR の伸張結晶化特性の解析を行っている。その結果、NR の伸張結晶化はひずみ 4 程度から開始し、ひずみ 8 で最大 15 %程度が結晶化し、その後収縮すると結晶層は消失することを示している(図 1.21, 図 1.22)[46]。

本内容はゴムの寿命とは直接関連はないが、本論文ではゴムの伸張結晶化に着目して長寿命化を図っているため、伸張結晶化の先行研究として記載している。

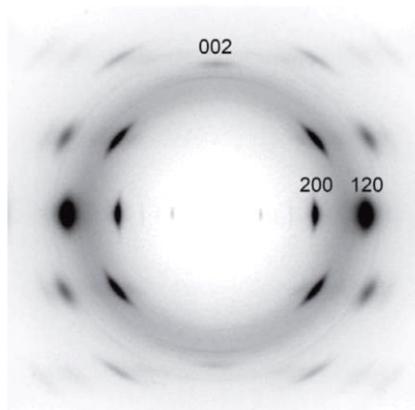


Fig. 1.21 WAXD pattern of NR[46]

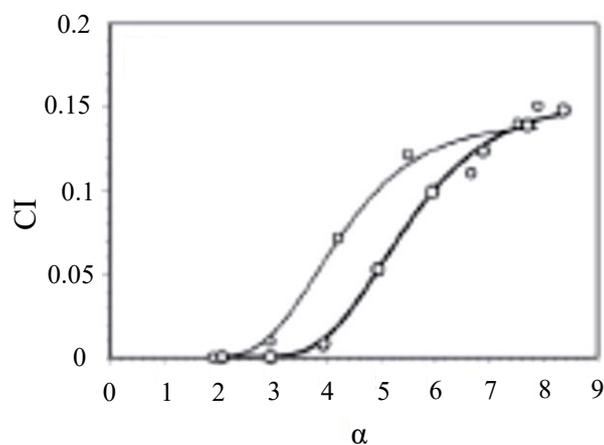


Fig. 1.22 Hysteresis curves of CI[46]

以上から、現在まで大変形を受けるアクチュエータ特有のゴム材料の長寿命化に関する検討は行われていない。

1.4 高分子の破壊

一般にゴム材料をはじめとする高分子材料が一定荷重を受けて破断に至る過程は次のように考えられている(図 1.23)[47].

- (1) ゴム材料が外力を受け分子鎖が伸張方向に引き伸ばされ配列しようとする. 分子鎖を構成する化学結合は物理結合よりはるかに強い為, はじめに分子鎖同士のすべり, 分離や再配列が起こる(図 1.23(a)).
- (2) 系内に分子鎖の再配列を妨げる因子が存在すると, その近傍にある分子鎖は緊張状態になり最初に外力を担う. この緊張状態が分子鎖の結合力よりも大きくなると, 局所的な分子鎖の切断が起こる(図 1.23(b)).
- (3) 1 個の分子鎖が切断されると, その隣の分子鎖が代わりに応力を担うようになるため, 分子鎖の切断はその周囲に移行し集合してやがてマイクロボイドを形成する(図 1.23(c)).
- (4) 系内に発生した無数のマイクロボイドのうち, 臨界の大きさに成長したものはマイクロクラックとなる. 臨界の大きさに成長しなかったものは破壊に関係ない存在として系内に残るか消滅する.
- (5) ミクロクラックは非可逆的に成長を続け, そのうち最大の大きさのものがマクロクラックとなる.
- (6) マクロクラックは, 巨視的にはその端部の最大主応力点を追いかけてながら引張り方向に直交して成長する. しかし, 微視的に見ると, マクロクラックはその突端部に形成される応力場内で成長したマイクロクラックと合体し, 破壊進行面に凹凸を形成しながら進む. そして最終的な全体破断に至る(図 1.23(d)).

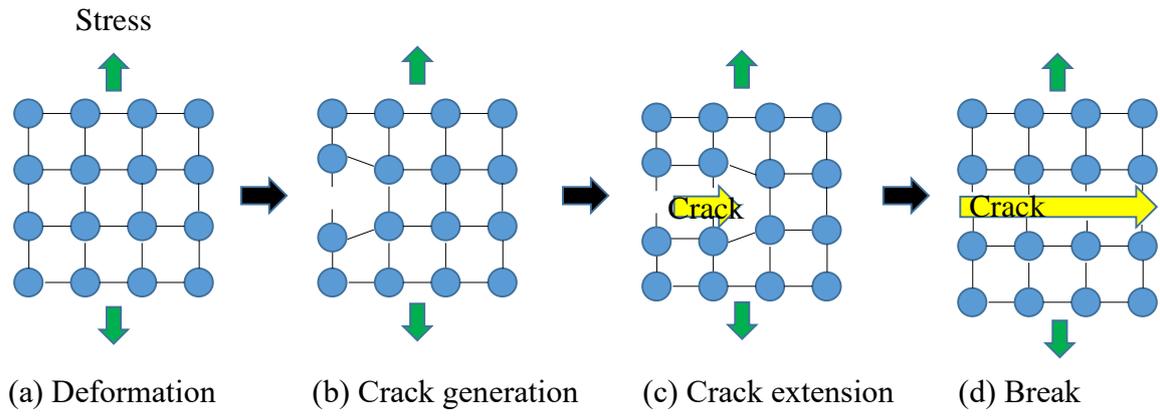


Fig. 1.23 Polymer breakdown process

1.5 研究目的

本研究では空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化を目標として、その実現のため以下の2つに取り組む。

1. 軸方向繊維強化型人工筋肉の破壊メカニズムの解明
2. 疲労寿命の向上

1.6 論文構成

本論文では、空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化を目指して、破壊メカニズムの解明と疲労寿命の向上に取り組む。第2章では、軸方向繊維強化型人工筋肉について述べる。第3章では、軸方向繊維強化型人工筋肉の特性と破壊メカニズムについて述べる。第4章では、FEMによる変形解析からゴム材料の目標値を設定して、材料開発を行う。また、人工筋肉のアスペクト比を変更した際の寿命と収縮特性についての評価を行う。第5章では、天然ゴムの伸張結晶化特性を利用した人工筋肉の長寿命化に取り組む。初めに広角X線回折により伸張結晶層の確認を行う。次いで、与圧印加による寿命評価を行う。第6章では、長寿命かつ高出力であるくびれ型人工筋肉の提案を行う。まず、くびれ型人工筋肉の寿命評価を行う。次いで、くびれ型人工筋肉の収縮特性評価を行う。最後に第7章で結論と今後の展望について述べる。

第 2 章 軸方向纖維強化型人工筋肉

第 2 章 軸方向繊維強化型人工筋肉

本章では、軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮メカニズム、収縮特性及び作製方法について述べる。

2.1 収縮メカニズム

図 2.1 に軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮の様子を示す。軸方向繊維強化型人工筋肉に空気圧を印加すると、軸方向にひきそろえた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する。その際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。

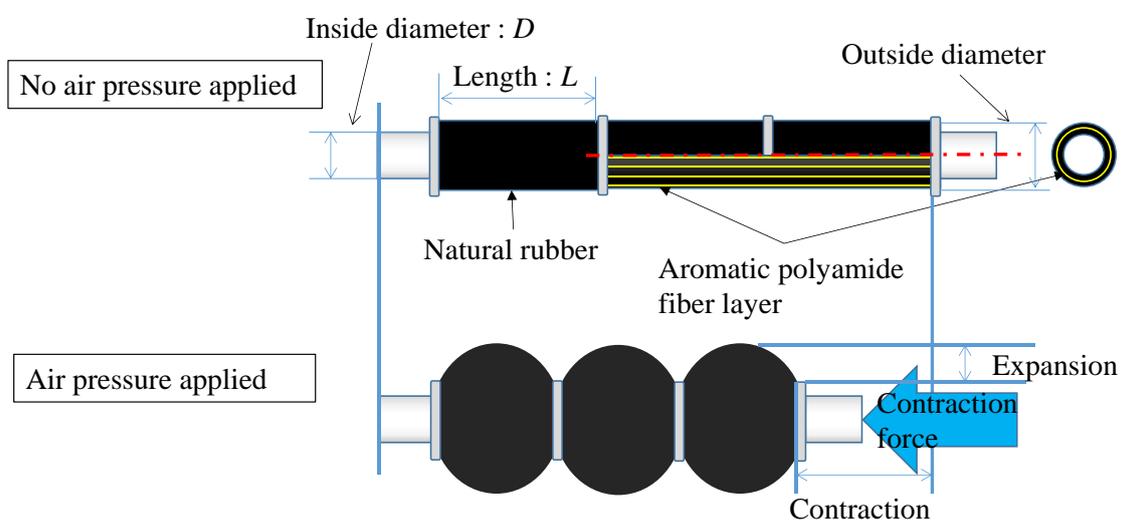


Fig. 2.1 Configuration of the straight-fiber-type artificial muscle

2.2 収縮特性

形状(内径：10 mm, 外径：14 mm, 長さ：180 mm, 20%収縮時の膨張径 20 mm)を揃えた際の軸方向繊維強化型人工筋肉と McKibben 型人工筋肉の自然長での印加圧力と収縮力の比較(図 2.2)及び無負荷時の印加圧力と収縮率の比較(図 2.3)を示す[48]. ここで図 2.2 の収縮力は, 人工筋肉の長さを初期長さに固定して, 空気圧を印加した際の発生力を測定した等尺性収縮によるものである. また収縮率とは, 無負荷で空気圧印加時の収縮量を空気圧無印加時の長さで除した値である. 図から, 同一圧力では軸方向繊維強化型人工筋肉の方が, 収縮力が大きく, McKibben 型が最大で約 500 N に対して, 軸方向繊維強化型は最大で約 2,000 N と 4 倍程度の収縮力となった. これから同一形状では軸方向繊維強化型の方が大きな出力を得られることがわかる. また, 同一出力では軸方向繊維強化型の方がより低圧で収縮力を発生できる. 同様に収縮率は図 2.3 より McKibben 型が最大で約 28 %に対して, 軸方向繊維強化型は最大で約 38 %と 1.3 倍程度となった. 軸方向繊維強化型では内筒にかかる空気圧の全体で収縮力に寄与するため高出力及び高変位となると考えられる. ここで, McKibben 型に補強繊維を内包させるとい構造も考えられるが, 空気圧を印加し膨張した際に, 繊維コードが大変形を拘束し, 補強繊維による拘束力を発揮することができないため, McKibben 型の性能向上に寄与しないことが予想される.

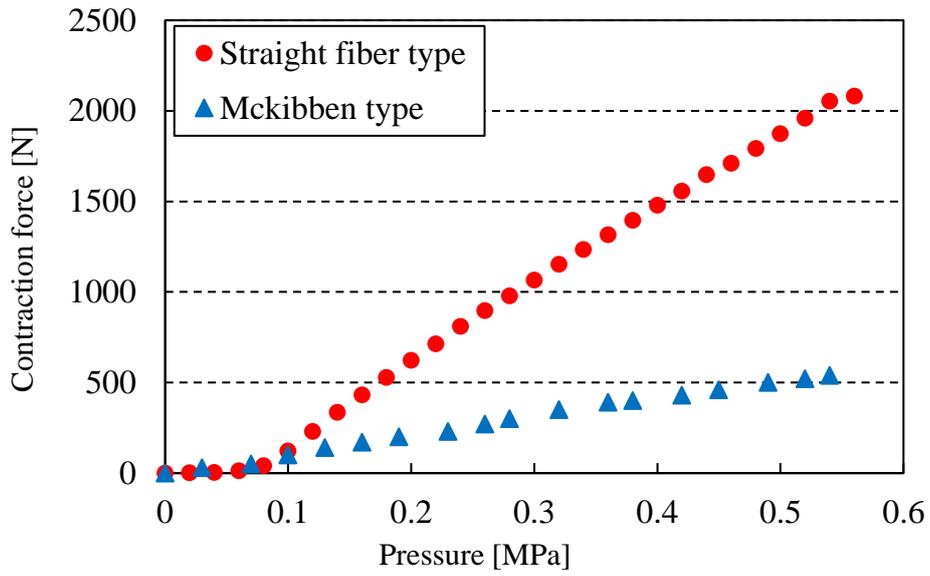


Fig. 2.2 Relationship between pressure and contraction force

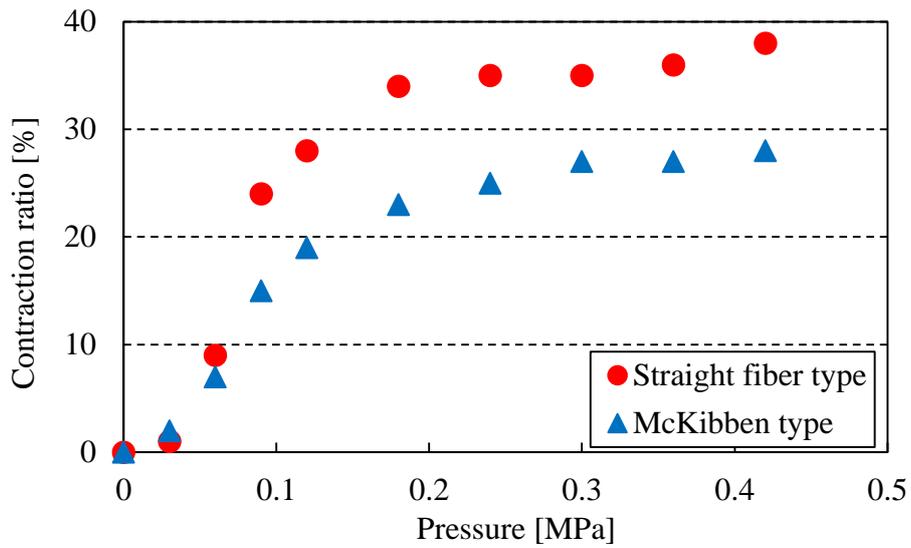


Fig. 2.3 Relationship between pressure and contraction ratio

2.3 作製方法

本人工筋肉には原料ゴムの形状により，ラテックス式及び固形ゴム式の 2 種類の作製方法がある．

2.3.1 ラテックス式

ラテックスを使用した人工筋肉の作製方法を以下に示す(図 2.4).

1. 芯にラテックスを塗布し，内層ゴムを形成する(図 2.4(a))
2. 1 を所定の厚みとなるまで繰り返す(図 2.4(b))
3. 内層ゴムに補強繊維を巻きつける(図 2.4(c))
4. 3 にラテックスを塗布し，外層ゴムを形成する(図 2.4(d))
5. 4 を所定の厚みとなるまで繰り返す(図 2.4(e))



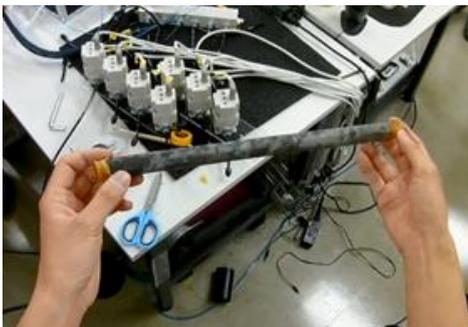
(a) Apply latex to the resin rod

(b) Repeat a multiple time



(c) Wrap the reinforcing fiber

(d) Apply latex



(e) Repeat a multiple time

Fig. 2.4 Fabrication method using latex

2.3.2 固形ゴム式

固形ゴムを使用した人工筋肉の作製方法を以下に示す(図 2.5).

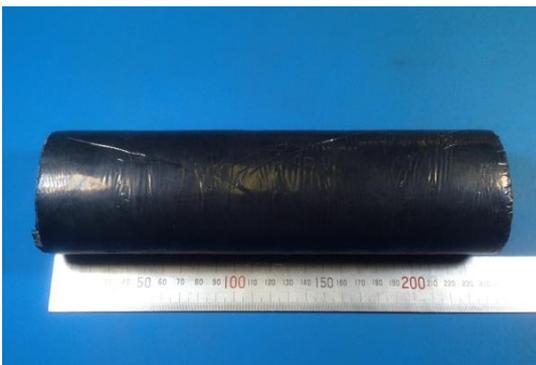
1. 固形ゴムに配合薬品を混合し，配合ゴムを作製する
2. 配合ゴムを所定の厚さのシート化する(図 2.5(a))
3. ゴムシートを所定の寸法に切断する
4. ゴムシートを芯に巻きつける(図 2.5(b))
5. 内層ゴムの外側に補強繊維を巻きつける
6. 補強繊維の外層にゴムシートを巻きつける
7. 加熱し加硫する



(a) Preparation of compound rubber



(b) Wrap runner around a metal rod



(c) Artificial muscle

Fig. 2.5 Fabrication method using solid rubber

第3章 軸方向繊維強化型人工筋肉の 特性と破壊メカニズム

第 3 章 軸方向繊維強化型人工筋肉の特性と破壊メカニズム

本章では、軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮特性及び破壊メカニズムについて述べる。

3.1 変形解析

3.1.1 ゴム材料のモデル化

3.1.1.1 ゴム材料のモデル

一般の金属材料と異なり、ゴム材料は外力により大変形が可能であり、外力が除かれるとほぼ元の形状に戻るといった特徴を持つ。また、応力とひずみは強い非線形関係であり、ほぼ非圧縮の特徴を持つため、ゴム材料は超弾性体として取り扱われる。ファン[49]によれば超弾性体の定義として、「ある物体が単位質量当たりのひずみエネルギー関数を持ち、それが均質な応力のない自然状態について、単位質量当たりのひずみエネルギー変化の割合が、応力により仕事をする割合に等しいように作られたひずみテンソルの解析関数であるとき、その物体を超弾性体という」。ゴム材料の FEM 解析を行う際には、その材料特性をモデル化する必要がある。強い非線形性を持つゴム材料モデルを数値化するために、様々な種類のひずみエネルギー関数が提案されている。代表的なひずみエネルギー関数を表 3.1 に示す。

Table 3.1 Typical strain energy function[50]

Strain energy function	Parameters	Nominal stress theory solution
Mooney	$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)$	$F=2(\lambda-1/\lambda a)(C_{10}+\lambda^b C_{01})$
Neo-Hooke	$W=C_{10}(I_1-3)$	$F=2C_{10}(\lambda-1/\lambda a)$
Mooney-Rivlin	$W = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N C_{mn} (I_1 - 3)^m (I_2 - 3)^n$	$F = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^a} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^b \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$
Ogden	$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3)$	$F = \sum_{n=1}^N \mu_n (\lambda^{\alpha_n - 1} - \lambda^{-1 - c \alpha_n})$
Yeoh	$W=C_{10}(I_1-3)+C_{20}(I_1-3)^2+C_{30}(I_1-3)^3$	$F=2(\lambda-1/\lambda^a)[C_{10}+2C_{20}(I_1-3)+3C_{30}(I_1-3)^2]$
Gent	$W=-(E/6)J_m \ln(1-J_1/J_m)$	$F=(E/6)(1/(1-J_1/J_m))(2\lambda-2\lambda^{-a})$

今回は様々なひずみエネルギー関数の中から, Mooney-Rivlin モデルを選定した. Mooney-Rivlin モデルではひずみエネルギーは式(3.1)のように表すことができる.

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N C_{mn} (I_1 - 3)^m (I_2 - 3)^n \quad (3.1)$$

W : 変形によるひずみエネルギー

λ : 各軸方向への伸張比

C_{mn} : 材料特有の定数

I_i : ひずみ不変量($i = 1-2$)

ひずみ不変量は以下の式で表される.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3.2)$$

$$I_2 = (\lambda_1 \lambda_2)^2 + (\lambda_2 \lambda_3)^2 + (\lambda_3 \lambda_1)^2 \quad (3.3)$$

$$I_3 = (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^2 \quad (3.4)$$

ここで, ゴム材料を非圧縮性材料であると仮定した場合,

$$I_3 = (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^2 \doteq 1 \quad (3.5)$$

とすることができる.

また, 一軸引張の場合では, 材料が等方性であり, 非圧縮であれば, 伸張比は式(3.6)の関係となる.

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (3.6)$$

式(3.5)より,

$$\lambda_2^2 = \frac{1}{\lambda_1} \quad (3.7)$$

また、式(3.2), (3.3), (3.6), (3.7)より,

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \quad (3.8)$$

$$I_2 = 2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} \quad (3.9)$$

となる.

ひずみエネルギー W を伸張比 λ で微分して応力を求めることができるので,

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\partial W}{\partial \lambda} \\ &= \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda} \end{aligned} \quad (3.10)$$

ここで、式(3.1), (3.8), (3.9)より

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = C_{10}, \quad \frac{\partial W}{\partial I_2} = C_{01} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial I_1}{\partial \lambda} = 2\lambda - \frac{2}{\lambda^2}, \quad \frac{\partial I_2}{\partial \lambda} = 2 - \frac{2}{\lambda^3} \quad (3.12)$$

C_{10} , C_{01} は材料特有の定数であり式(3.11)で定義される.

したがって、これを式(3.10)に代入し、モデルに生じる応力を、 λ を用いて以下のように表すことができる.

$$\begin{aligned} \sigma &= C_{10} \left(2\lambda - \frac{2}{\lambda^2} \right) + C_{01} \left(2 - \frac{2}{\lambda^3} \right) \\ &= \left(2C_{10} + \frac{2C_{01}}{\lambda} \right) \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.1.1.2 ゴム材料の引張試験

本項では、ゴム材料モデルの材料定数を決定するためにゴム材料の引張試験を行う。試験装置概略を図 3.1 に示す。リング状の試験片をシャックルで固定する。電動スライダを稼働させた際の応力をロードセルで計測する。試験サンプルは天然ゴムの内径 12 mm, 外径 14 mm, 幅 10 mm のリング状試験片を用いた。試験結果を図 3.2 に示す。横軸はひずみで縦軸は応力である。試験結果から、天然ゴムの応力ひずみ特性は非線形であり、ひずみの増加とともに応力が急激に立ち上がっている。この試験結果を式(3.13)に適用し、最小二乗法を用いて Mooney-Rivlin モデルにおける材料定数 C_{10} 及び C_{01} を以下のように決定した。

$$C_{10}=0.09053 \text{ MPa}, \quad C_{01}=0.06034 \text{ MPa}$$

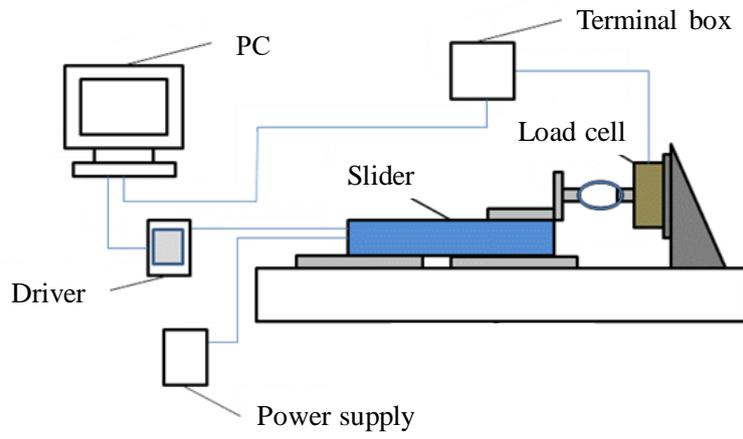


Fig. 3.1 Outline of tensile testing machine

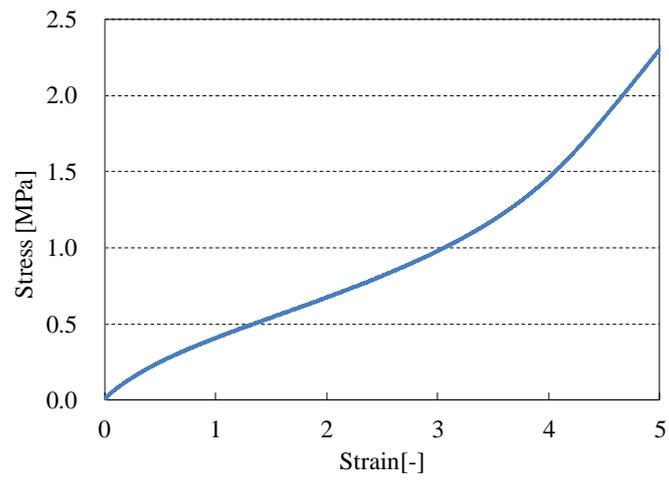


Fig. 3.2 Stress-strain curve of NR

3.1.1.3 FEM 解析

前項では、ゴム材料の引張試験からゴムの材料定数を決定した。本項では、決定した材料定数を用いて、FEM 解析を行う。解析ソフトは ANSYS を用いた。作成したモデルを図 3.3 に要素分割を図 3.4 に示す。モデルの形状は長さ 12 mm、幅 10 mm、長さ 2 mm の直方体である。モデルに一樣な応力がかかるように、モデル左面の x 変位を 0、底面の y 変位を 0、手前面の z 変位を 0 に設定した。本モデルにひずみが 4 となるまで y 方向変位をかけて解析を行った。解析結果と実験結果の比較を図 3.5 に示す。図 3.5 から解析結果(Mooney-Rivlin 理論値)はひずみ 3 程度までは実験結果とおおむね一致していることがわかる。図 4.2 に後述するように L/D 比が 4 以下の場合には収縮時にゴム材料にかかる最大ひずみは 3 以下であることがわかる。したがって L/D 比が 4 以下の軸方向繊維強化型人工筋肉を想定した場合は材料定数の値が妥当であると考えられる。

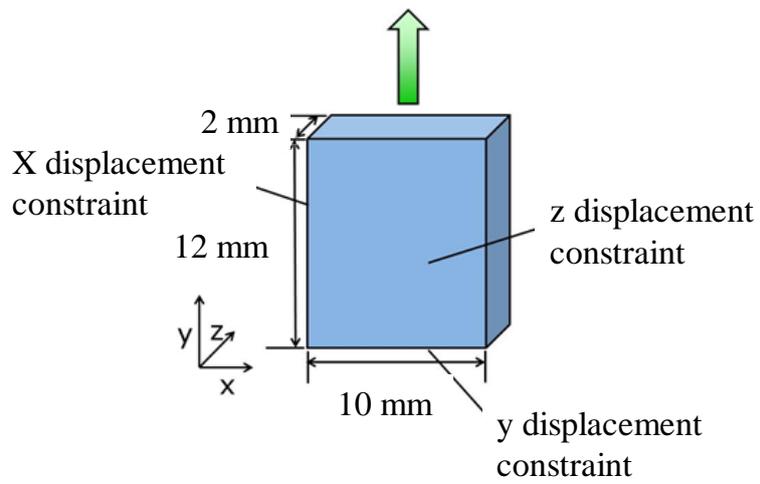


Fig. 3.3 Analysis model

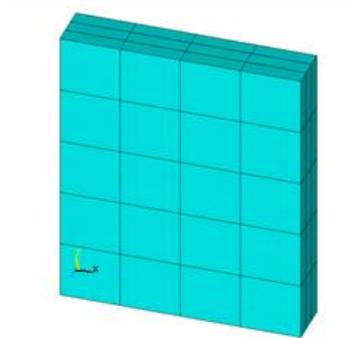


Fig. 3.4 Model meshing

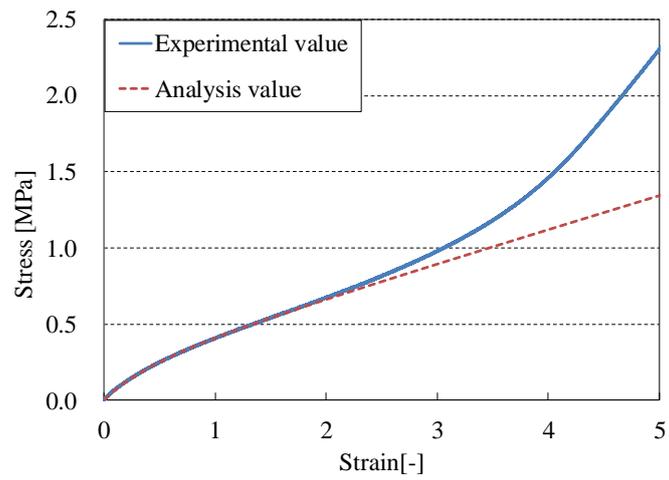


Fig. 3.5 Comparison of analysis and experiment

3.1.2 FEM 解析のための人工筋肉モデル

前節から、ゴム材料モデルの選定及び材料定数を決定して、その妥当性を確認した。本節では、軸方向繊維強化型人工筋肉のモデル化を行う。軸方向繊維強化型人工筋肉の稼働部長さを L とした際に、 $L/2$ の部分を基準に対称な変形をすると仮定して、図 3.6 に示す青い丸で囲んだ長さ $L/2$ のモデルを作成した。また、モデル化を行うのは断面部分であり、中心軸に関して対称となるように設定した。作成したモデルを図 3.7 に示す。厚さ 1 mm の 2 つのゴム層の間に補強繊維層を挿入し軸方向繊維強化型人工筋肉をモデル化している。表 2.2 に解析条件の詳細を示す。また、モデルは図 3.8 に示すように内外ゴム層をそれぞれ x 方向に 6 分割、 y 方向に 30 分割した。

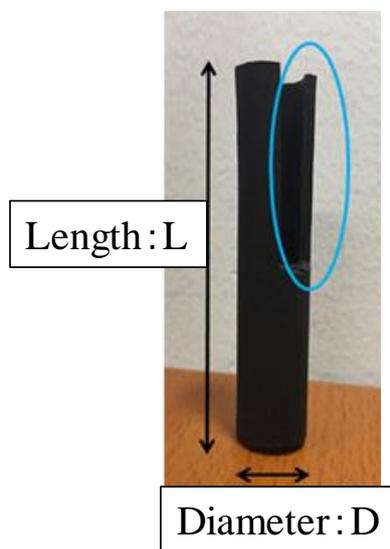


Fig. 3.6 SF-ARM to model

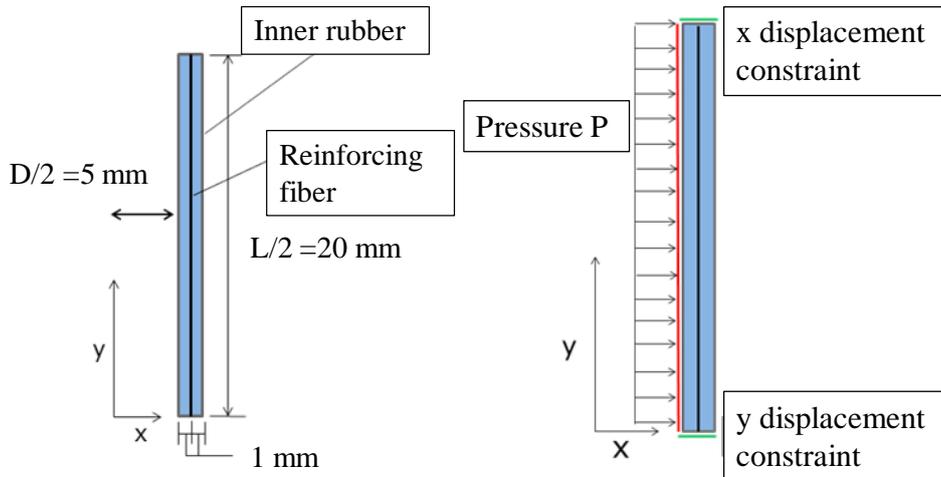


Fig. 3.7 Model of artificial muscle

Table 3.2 Analysis condition details

ANSYS	Parameter	
Menu	Construction	
Element type	Solid quadrilateral 4 nodes 182 Element behavior Axisymmetric Element formulation U-P mixing Link actuator 11	
Real constant	Link 11 spring constant k 1E8	
Material property	Material model Mooney-Rivlin $C_{10} = 0.09053$ [MPa] $C_{01} = 0.06034$ [MPa]	
Analysis options	Static large deformation	
Time control	Load step end time : 4 [s] Time step size : 0.01 [s] Minimum time step : 0.0001 [s] Maximum time step : 0.1 [s]	
Constraint / Displacement	(5 ≤ x ≤ 7, y=0): x direction displacement 0 (5 ≤ x ≤ 20, y=0): y direction displacement 0	
Pressure P	Time step [s]	Pressure [MPa]
	0	0
	1	0.1
	2	0.2
	3	0.3
	4	0.4
Range: x=5, 0 ≤ y ≤ 20		

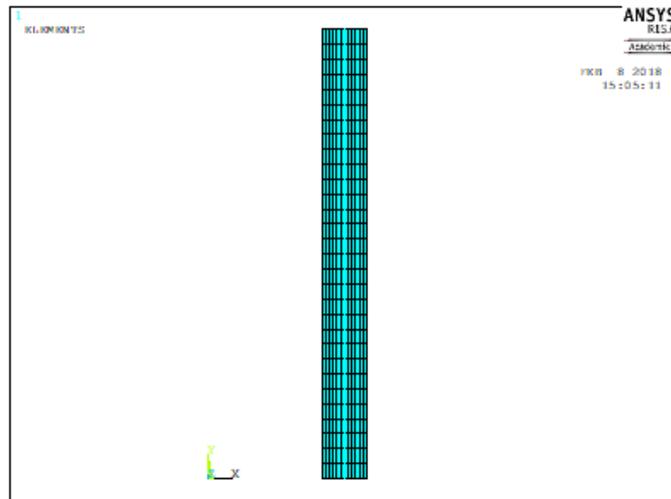
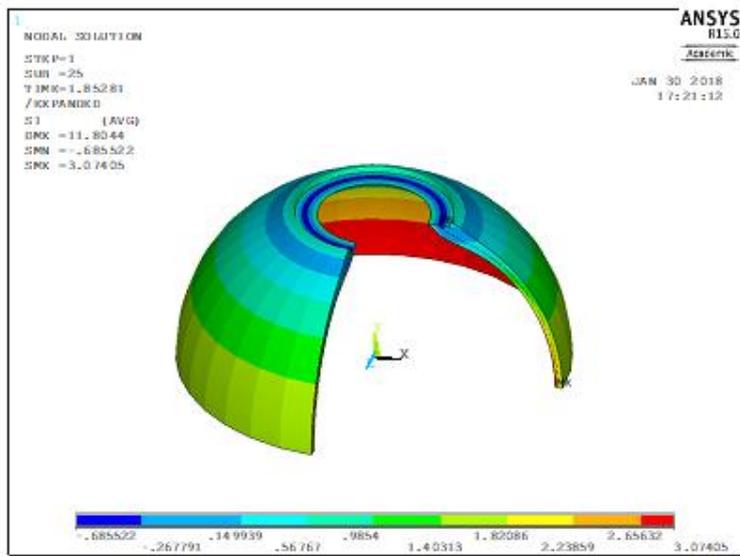


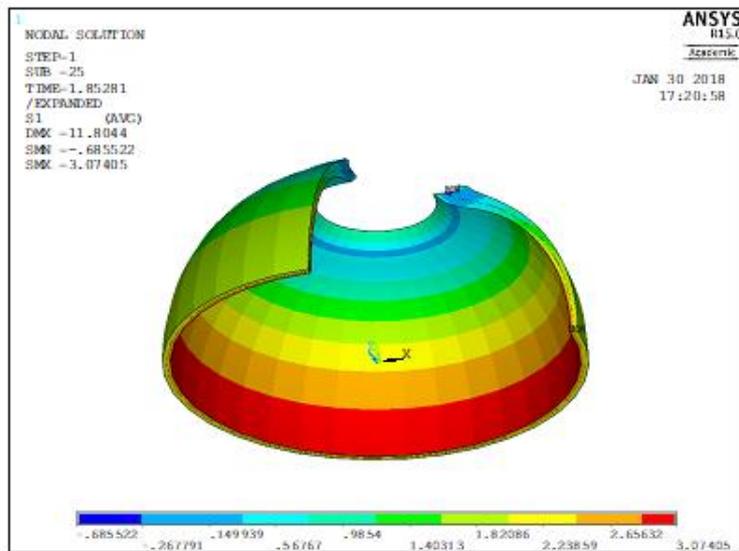
Fig. 3.8 Model meshing

3.1.3 FEMによる人工筋肉の変形解析

前項までにゴム材料及び軸方向繊維強化型人工筋肉のモデル化を行った。本項ではモデル化した軸方向繊維強化型人工筋肉の変形解析を行い変形時の応力分布を算出する。解析結果を図 3.9 に示す。モデルの色分けは第一主応力の大きさを表しており、青から赤になるにつれて応力が大きくなっている。軸方向繊維強化型人工筋肉の変形時の稼働部の中間点($L/2$ の部分)の内層ゴムに生じる応力に着目すると、同箇所の外層ゴムに生じる応力と比較して約 1.5 倍、端部に生じる応力と比較すると 10 倍以上であることがわかった。



(a) External principal stress distribution



(b) Internal principal stress distribution

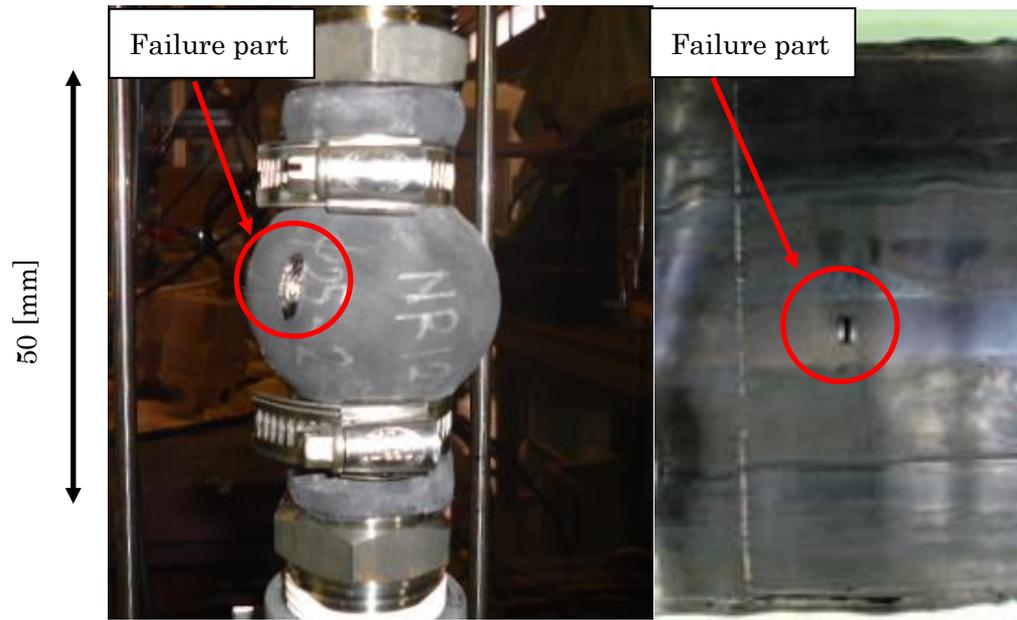
Fig. 3.9 SF-ARM deformation analysis results

3.2 破壊メカニズム

表 3.3 に軸方向繊維強化型人工筋肉の主な破壊モードを示す。破壊モードとしてゴムの大変形，繰返し動作によるもの，繊維の強度不足によるもの，ゴムの環境劣化によるもの及び製造上に不具合によるものなどが挙げられる。その中で，ゴムの大変形，繰返し動作に起因するものが最も頻度が高い[43][51]。図 3.10 に大変形，繰返し動作による破壊の様子を示す。図 3.10(a)外層ゴムの破壊の様子である。外層ゴムの中央部付近に軸方向に平行に亀裂が発生している。図 3.10(b)は破裂後サンプルの内層ゴムである。最も膨張の大きい中央部付近の内層に軸方向に亀裂が発生し，その亀裂が成長して破裂に至る。

Table 3.3 Artificial muscle failure mode

Failure mode	Factor
Rubber destruction	Large deformation, repeated operation
Fiber breakage	Lack of strength
Rubber deterioration	Environment impact
Fiber and rubber peeling	Manufacturing defects
Destruction by rubber foreign matter	
Fixed part destruction	



(a) State of outer rubber destruction (b) State of inner rubber destruction

Fig. 3.10 Failure mode of SF-ARM

3.3 本章まとめ

本章では有限要素法を用いて、ゴム材料及び人工筋肉をモデル化し、人工筋肉の変形解析を行った。次いで人工筋肉の破壊メカニズムについて述べた。得られた結果を以下に示す。

- (1) Mooney-Rivlin モデルを用いてゴム材料のモデル化を行った。ゴム材料の一軸引張試験から材料定数を決定した。
- (2) FEM 解析による人工筋肉の変形解析から、稼働中央部には端部の 10 倍程度の応力集中が発生していることがわかった。また、内層ゴムには外層ゴム 1.5 倍の応力がかかっていることがわかった。
- (3) 軸方向繊維強化型人工筋肉の破壊モードについてまとめた。

第4章 L/D 比の変更による寿命 及び収縮特性への影響評価

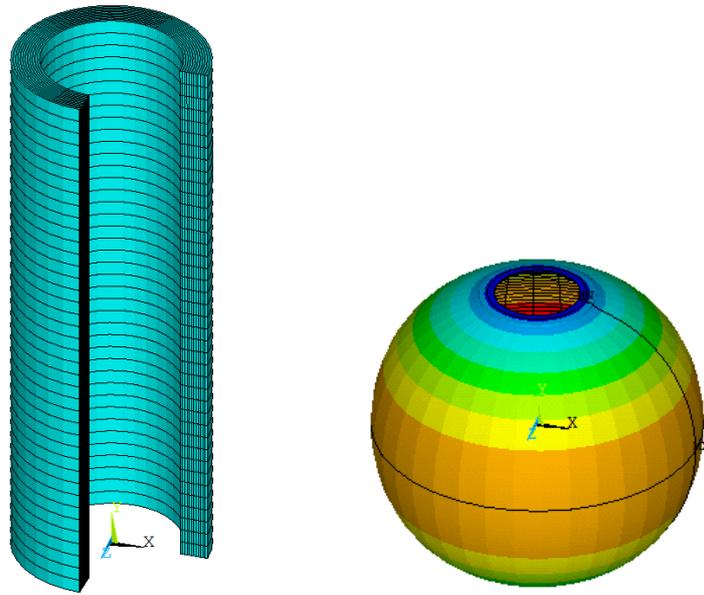
第 4 章 L / D 比の変更による寿命及び収縮特性への影響評価

4.1 有限要素法による変形解析

3.2 節から軸方向繊維強化型人工筋肉は、半径方向に補強繊維が入っていないため、空気圧を印加した際にゴムに大きなひずみがかかり、その部分から破壊する[52]. そこで、McKibben 型の有限要素法による動作解析の研究例[53]を参考に、膨張時のゴム材料のひずみを把握し、ゴム材料検討の指標とするため、また、 L / D 比を変更することでゴム材料にかかるひずみへの影響を確認するために、有限要素法による変形解析を行った.

4.1.1 各種 L / D 比と収縮率

解析ソフトウェアとして、ANSYS 15.0 を使用した. 解析の対象とする軸方向繊維強化型人工筋肉のモデルは、内層ゴムチューブ内径 10 mm, 厚さ 1 mm, 補強繊維, 外層ゴムチューブ内径 12 mm, 厚さ 1 mm とした(図 4.1(a)). 上述のゴムの材料モデルとして Neo Hookean モデルを用い、材料定数は天然ゴムの引張試験より 0.024 N/mm^2 とした. 補強繊維は引張弾性率 $2,000 \text{ N/mm}^2$ とした[54]. ゴムチューブは 4 節点有限ひずみ要素(SOLID181), 補強繊維は Link11 の Linear Actuator として設定した. 直交座標系を用い、人工筋肉の上端は x 方向に自由度を変位拘束して、下端は x, y, z 方向に自由度を変位拘束した. 内層ゴムチューブの内面から均等に圧力を印加して、その際の収縮率及びゴムのひずみを算出した(図 4.1(b)). 図 4.1(b)は青からオレンジになるにつれてひずみが大きくなっている. これから中央付近が最もひずみが大きくなることがわかる. 図 4.2 は人工筋肉の内径 D と稼動部長さ L のアスペクト比 L / D を 2 から 8 まで変更した際の収縮率とゴムにかかる最大ひずみの解析結果である. 横軸は収縮率, 縦軸はゴムにかかる最大ひずみである. 図より収縮率が大きくなるにつれてゴムのひずみも大きくなることがわかる. アスペクト比が 8 と大きい場合では、収縮率が 38 %程度になるとゴムにはおよそ 5.5 のひずみが発生することがわかる. これから、2 から 8 の各 L / D 比で収縮率 38 %を達成できるように、ゴム材料の破断時伸びの目標値として 600 %を設定した. 一方で、アスペクト比が小さくなると最大収縮率及びゴムに発生するひずみが小さく長寿命化が期待できるが、その分収縮特性については低下する. 収縮特性を向上させるためにはアスペクト比を大きくする必要があるが、その分ゴム材料にかかるひずみが大きくなり、寿命が短くなる.



(a) Model of FEM analysis (b) Deformation analysis

Fig. 4.1 FEM result of the SF-ARM

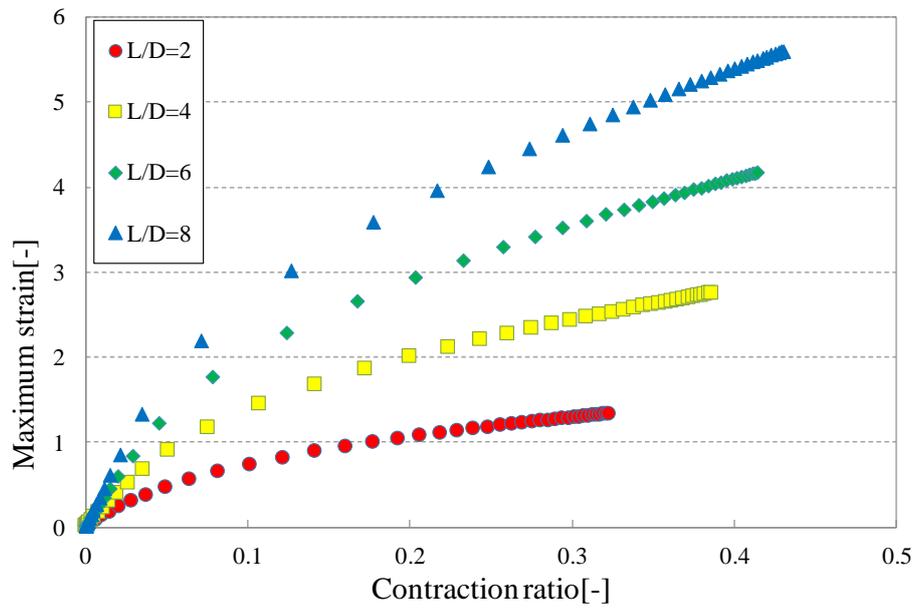


Fig. 4.2 Relation between contraction ratio and rubber maximum strain

4.2 ゴム材料の検討

4.2.1 ゴム材料の検討

一般にゴム製品には、原料となるゴムの他にカーボンブラック等の補強性材料、耐熱性、耐オゾン性等を改善するための老化防止剤、加工性を改善するための可塑剤、加工助剤、ゴム分子同士を結合させゴム弾性を発現させる架橋剤が配合されている。また、ゴム製品の性能の大部分は原料ゴムにより決まることが知られている。本節では、前節の解析結果から軸方向繊維強化型人工筋肉の理論上の最大収縮率 38%と長寿命化を両立させるために、ゴム材料の破断時伸び 600%以上(JIS K6251 準拠)を目標とした。まず、軸方向繊維強化型人工筋肉の材料として適していると考えられるゴムを 5 種類選定した。表 4.1 に 5 種のゴム材料の特徴を示す。

Table 4.1 Characteristics of various rubbers

Rubber	Feature
NR(Natural rubber)	A rubbery polymer obtained from a natural plant. Excellent mechanical properties.
CR(Chloroprene rubber)	It has average properties such as weather resistance, ozone resistance, heat resistance.
NBR(Nitrile butadiene rubber)	Excellent in oil resistance and heat resistance.
EPDM(Ethylene propylene rubber)	Excellent ozone resistance and heat resistance.
TPE(Thermoplastic elastomer)	It has both rubber and resin properties.

4.2.2 物性評価

それぞれの硬度と破断時伸びを測定して(図 4.3), 5 種類のゴム材料の中で目標に最も近い天然ゴム(NR)をゴム材料として選定した. 次に, この天然ゴムの配合を基本配合として, 硬度と破断時の伸びに対する可塑剤(非補強性添加剤, ゴムの加工性を改善し, 硬度を低下させる)の変量による影響を検討するため, 4 種類の配合を検討した. 検討した配合は NR をゴム材料として, 可塑剤を配合 1 に 30 phr 添加した. その後, 配合 2 から 4 の順に 10 phr ずつ増量させた. ここで, phr(parts per hundred parts of rubber)とは原料ゴムの重量を 100 とした場合の配合剤重量を表す. なお, 可塑剤以外の薬品については全て同量を添加した. その硬度と破断時伸びの測定結果を図 4.4 に示す. 可塑剤を多く含有させることで, 硬度を低下させ破断時伸びを大きくなった. 可塑剤添加量の多い配合 2, 3, 4 で目標の物性を満足したが, 配合 3, 4 では低硬度化しすぎてしまい, 軸方向繊維強化型人工筋肉を作製する際の成形性が悪く採用することが困難であった. そのため以降の検討には配合 2 を用いた. 図 4.5 に配合 2 の応力-ひずみ曲線を示す. 短冊型(50×10×1 mm)に裁断した試験片を万能引張試験機 AUTOGRAPH AGS-J(SHIMADZU 製)で, 200 mm/min の速度で引張試験を行い, 応力-ひずみ曲線を求めた(JIS K6251 準拠). 配合 2 では応力-ひずみ曲線は一般的な NR のものと同様に, ひずみ 1 から 4 のあたりでは勾配が緩やかになり, 8 を超えたあたりから急激に立ち上がっている. 一般的に軸方向繊維強化型人工筋肉のゴム材料としては, 破断時伸びが大きく, 低ひずみ領域での応力が低いものが適していると考えられる. 配合 2 ではひずみ 8 あたりから応力が急激に増加しているが, 実際の使用ではひずみ 6 程度までであることが前節の解析結果から確認できているため, アスペクト比 2 から 8 までの任意な形状で理論上の最大収縮率 38 %を達成可能なゴム材料であると考えられる.

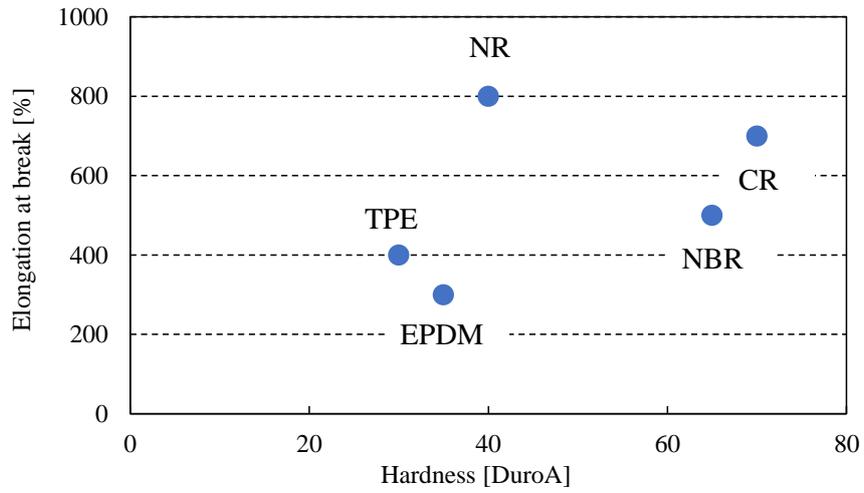


Fig. 4.3 Physical properties of elastomers

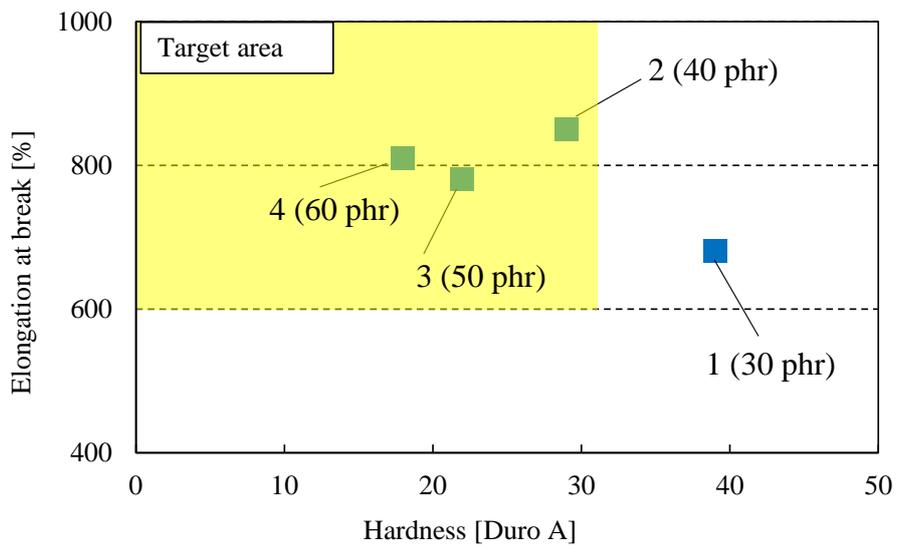


Fig. 4.4 Physical properties of various NR compounding

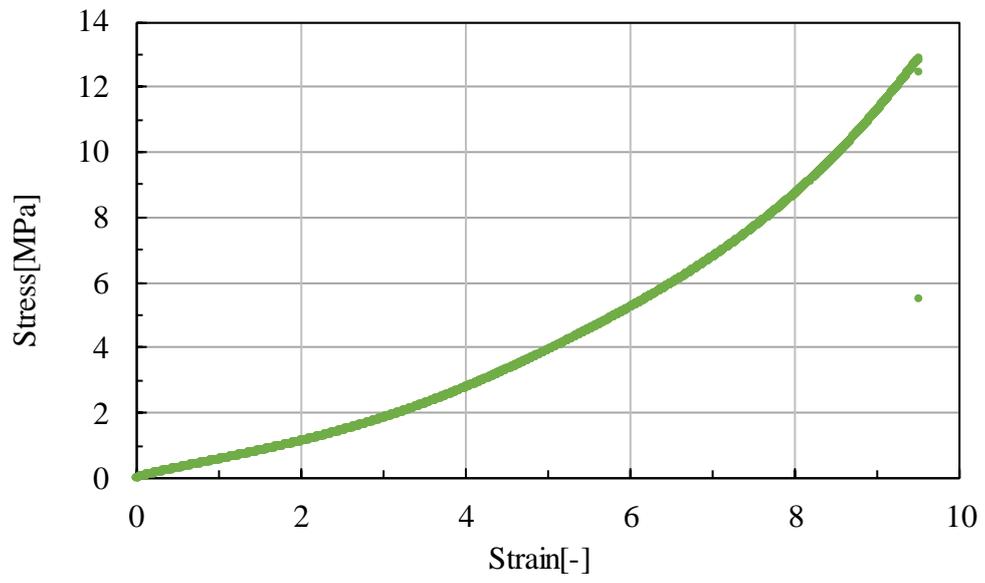


Fig. 4.5 Stress-Strain curve

4.2.3 アレニウスの式による経年劣化の予測

軸方向繊維強化型人工筋肉の経年劣化を予測するために、前節で検討した材料に対して、化学反応速度論に基づくアレニウスの式(4.1)を用い[55]、使用温度より高い温度条件で熱老化を加速させる試験から、天然ゴム配合 No.2 の室温下でのゴム材料の劣化予測を試みた。JIS K6257 に基づき 70, 85, 100 及び 120 °C の温度条件下で、8, 24, 48, 72, 200, 500 及び 2000 時間熱老化させたのち、JIS K6251 により破断時伸びを測定した(図 4.6)。熱老化により破断時伸び 100 %より低下した条件はその時点で試験を終了した。熱老化試験における各温度条件下の反応速度定数を求め、式(4.2)より破断時伸び 600%に到達する時間が得られる。図 4.7 に各温度での破断時伸び 600%到達時間を示す。前述の有限要素法解析より、破断時伸びが 600%あれば使用可能であることがわかっているため、熱老化試験後の破断時伸び 600%を目安として設定した。

$$k = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (4.1)$$

k : 反応速度定数, A : 頻度因子, T : 絶対温度 [K], R : 気体定数 [$\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$]
 Ea : 活性化エネルギー [Jmol^{-1}]

$$t_{600} = B \exp\left(\frac{C}{T}\right) \quad (4.2)$$

t_{600} : 破断時伸び 600%到達時間 [h]

B, C : 材料固有の定数

図 4.7 に示すように、最小二乗法により $B=6 \times 10^{-9}$ 及び $C=8287$ を得た。式(4.2)より、室温(23 °C)下において 8640 h(360 日相当)で破断時伸び 600%に低下すると予測できる。この結果から、作製後室温下で 1 年間使用せずに保管した人工筋肉でも収縮率 38%で使用できることがわかった。

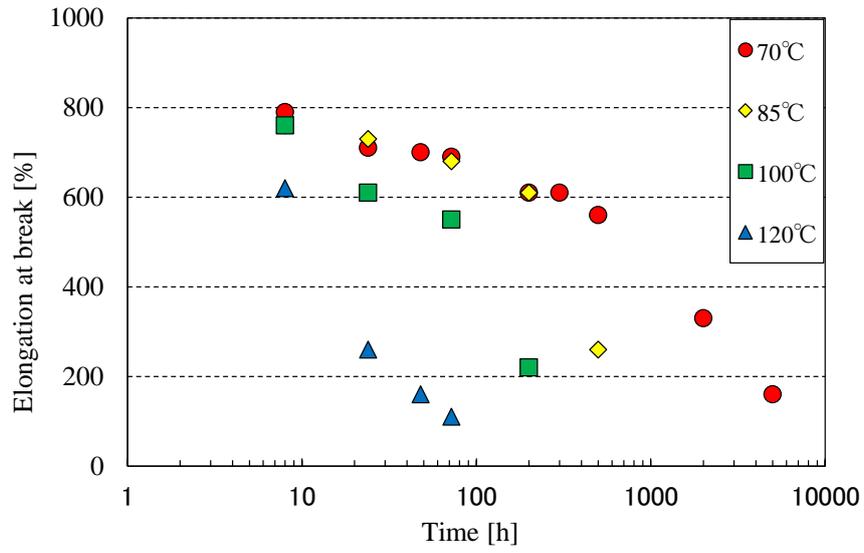


Fig. 4.6 Heat aging test result

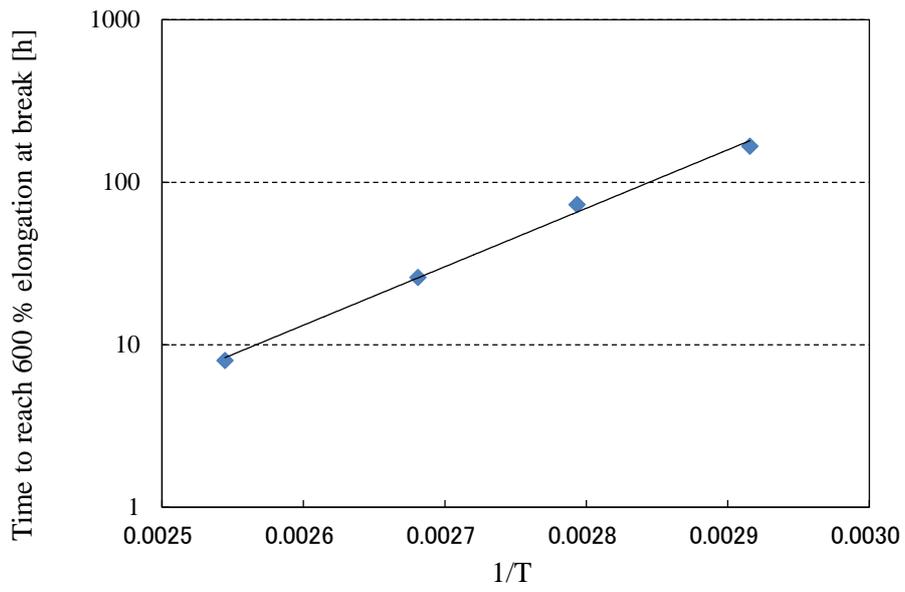


Fig. 4.7 Arrhenius plot

4.3 L/D 比の変更による寿命評価

4.1 節の解析結果から、アスペクト比を小さくすることで、ゴムにかかるひずみを低減できることがわかった。そのため 4.2 節で開発した材料を用いて、実際にアスペクト比を変更した軸方向繊維強化型人工筋肉を作製し、疲労寿命の測定を行った。まず、軸方向繊維強化型人工筋肉の長さ L 及びチューブ径 D とした際のアスペクト比 $L/D = 2 \sim 9$ に対応する軸方向繊維強化型人工筋肉を 16 種作製した(表 4.2)。次に、作製した軸方向繊維強化型人工筋肉を繰返し加圧し、破壊に至るまで耐久試験を実施した。試験装置の概略を図 4.8 に示す。予め測定した軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮率((無印加時全長-膨張時全長)/無印加時全長)が 20%になる圧力を 10 秒周期で印加して、破壊までの繰返し伸縮の回数を測定した。また、収縮率 20%時の最大膨張径(外径)を測定して、無加圧時の外径との比を最大膨張率とした。この最大膨張率は外面ゴム表面の周方向最大伸びに相当する。本試験では、ゴムチューブ以外での破壊を避けるため無負荷で試験を実施した。図 4.9 に破壊に至る繰返し加圧回数に対する周方向最大伸びの結果を示す。グラフより疲労寿命の対数と膨張率には線形的な関係性が得られた。そのため、任意の軸方向繊維強化型人工筋肉の形状と使用状態から予測可能な膨張率を用いて、疲労寿命の予測ができると言える。また、アスペクト比を小さくすることでゴムの伸びを抑えることができ寿命を向上させることができる。アスペクト比 9 の場合、最大膨張部の伸張率は約 380%であるのに対して、同 2 の場合伸張率は約 170%となる。また、 $L=43$ 及び $D=25$ の人工筋肉の繰返し伸縮回数が 12.7 万回と最も長寿命であった。図 4.10 は図 4.9 の縦軸を収縮率とした図である。これも図 4.9 と同様に右肩下がりとなっており、収縮率が小さいほど疲労寿命が長くなっている。これから、収縮率と疲労寿命の相関関係が見て取れる。

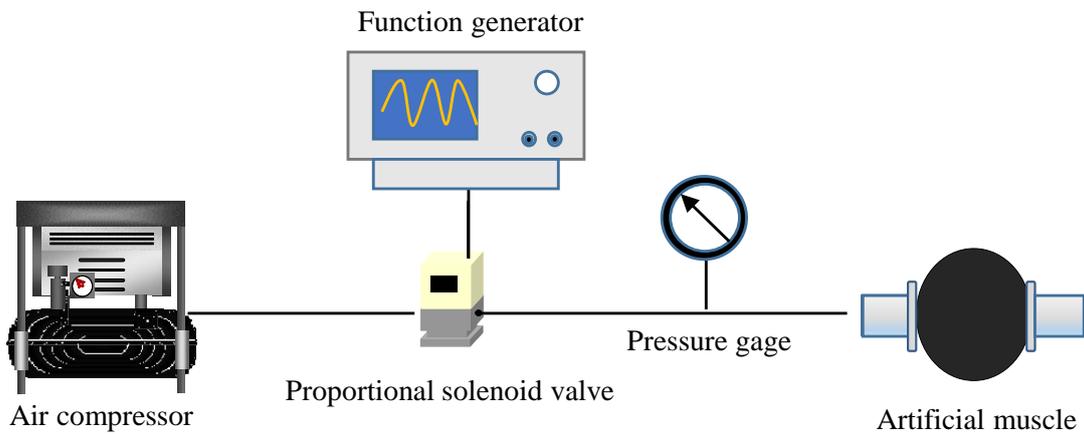


Fig. 4.8 Experimental setup

Table 4.2 Specifications of the samples

No.	Inside diameter [mm]	Outside diameter [mm]	Length [mm]	L / D
1	10	16	87	9
2	10	16	79	8
3	10	16	77	8
4	10	16	75	8
5	15	21	87	6
6	15	21	90	6
7	15	21	58	5
8	15	21	57	4
9	20	26	51	3
10	20	26	62	3
11	20	26	48	2
12	20	26	90	5
13	20	26	89	4
14	25	31	84	3
15	25	31	79	3
16	25	31	42	2

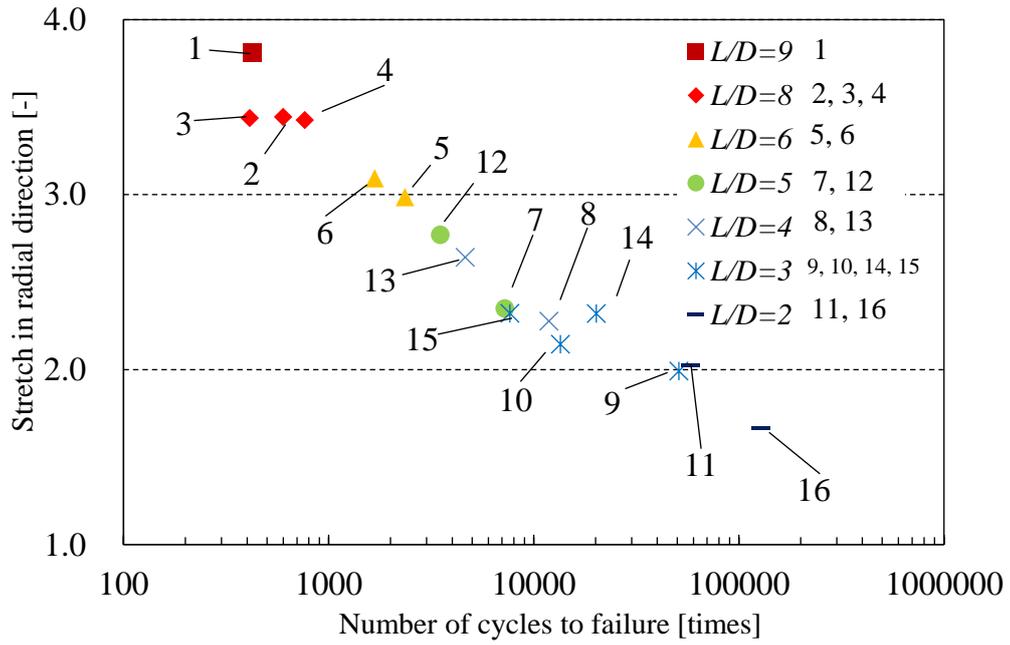


Fig. 4.9 Fatigue life of straight-fiber-type artificial muscle

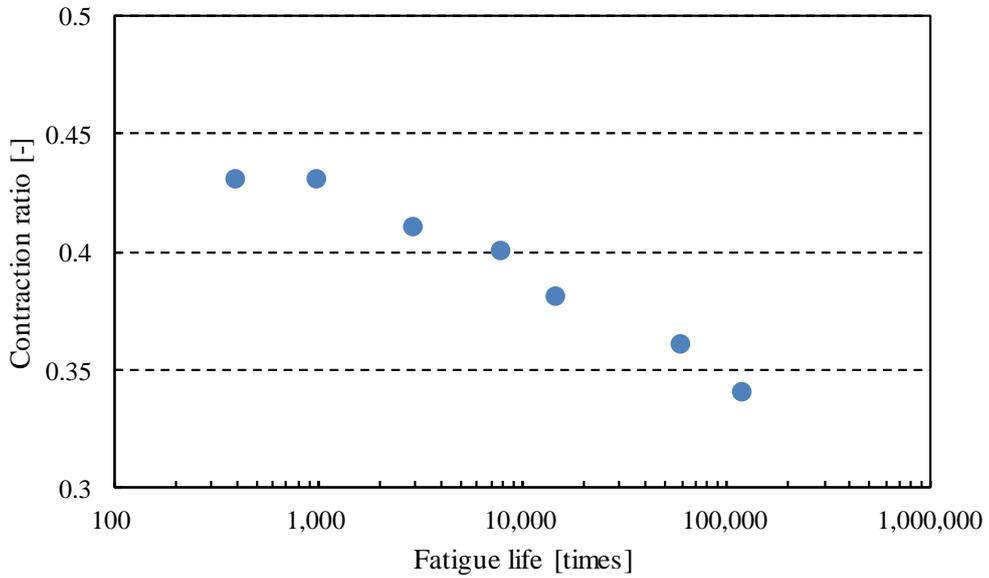


Fig. 4.10 Relationship between contraction ratio and fatigue life

4.4 L/D 比の変更による収縮特性評価

4.3 節では、軸方向繊維強化型人工筋肉の疲労寿命を延ばすために内径及び稼動部長さを変更した結果、内径が大きく稼動部長さが短いほど(アスペクト比が小さいほど)、ゴムにかかるひずみを低減することができるため、長寿命であることを確認した。一方で、アスペクト比が小さくなると、軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮特性が低下することが予測される。以上から、アスペクト比変更による軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮特性への影響を確認するために、4.2 節で検討した材料を用い作製した軸方向繊維強化型人工筋肉の等尺性収縮力及び収縮率特性の測定を行った。なお、本節での軸方向繊維強化型人工筋肉の等尺性収縮力および収縮率の測定はアスペクト比を変更した際の性能面への影響を確認するためのものであり、様々な条件での McKibben 型人工筋肉との比較を行うものではない。

4.4.1 実験条件及びサンプル

使用した測定装置を図 4.11 に示す。空気圧コンプレッサを圧力源として、比例電磁弁を介して軸方向繊維強化型人工筋肉へ空気圧を印加する。まず、軸方向繊維強化型人工筋肉の内径を固定して、長さを変更した際の等尺性収縮力及び長さを固定して、内径を変更した際の収縮力を測定した。サンプル詳細を表 4.3 及び 4.4 に示す。次に、圧力を印加した際の軸方向繊維強化型人工筋肉の軸方向への収縮量を測定した。測定したサンプルは表 4.3 及び 4.4 と同一であり、軸方向繊維強化型人工筋肉の長さはリングを入れることで調整した。

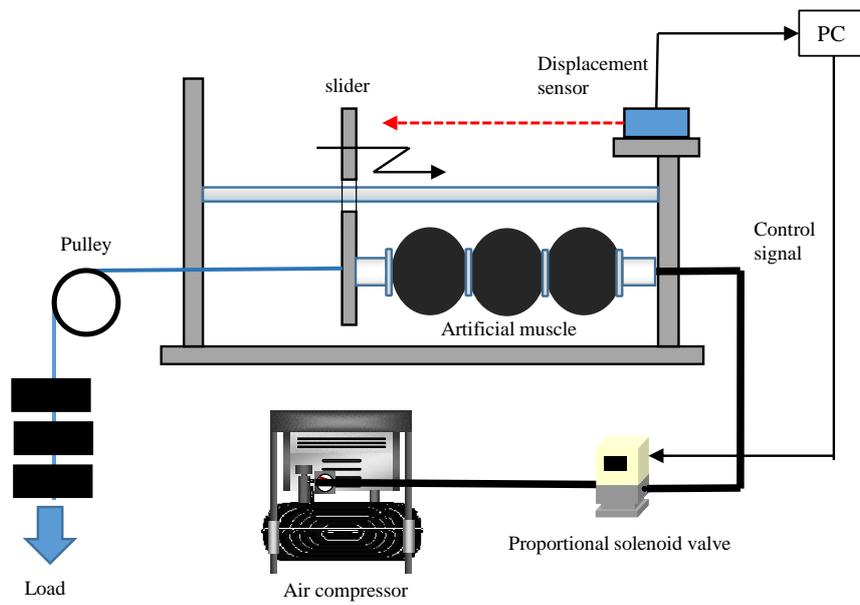


Fig. 4.11 Experimental setup for contraction ratio and force measurement

Table 4.3 Specifications of the samples at various length

No.	1	2	3
Inside diameter [mm]	25	25	25
Rings	4	5	6
Length [mm]	60	45	30
L / D ratio	2.4	1.8	1.4

Table 4.4 Specifications of the samples at various diameter

No.	4	5	6	7
Inside diameter [mm]	10	15	20	25
Rings	4	4	4	4
Length [mm]	60	60	60	60
L / D ratio	6	4	3	2.4

4.4.2 収縮力

図 4.12 に内径を 25 mm に固定して、稼動部長さを 30 から 60 mm に変化させた際の等尺性収縮力の測定結果を示す。同一内径では稼動部長さが長い方が(アスペクト比が大きい)等尺性収縮力が大きいという結果となった。稼動部長さが長くなることで円筒部の受圧面積が大きくなり、その結果出力も大きくなったと考えられる。

次に、稼動部長さを 60 mm に固定して、内径を 10 から 25 mm に変化させた際の等尺性収縮力の測定結果を図 4.13 に示す。同一長さで同一圧力の場合には内径が大きい方が、収縮力が大きいという結果となった。これも同様に、内径を大きくすることで受圧面積が大きくなり、その結果出力が大きくなったと考えられる。ここで、内径を大きくすることで周方向(力を発揮する方向)とともに軸方向(力を打ち消す方向)の受圧面積も増加することが考えられる。表 3.5 に内径を変化させた際の軸方向の受圧面積による伸長力の比較を示す。表 3.5 から内径を大きくすることで軸方向への伸長力が増加しているが、それ以上に周方向に面積増加による収縮力も増加しているため、差し引きでは、収縮力が増加していると考えられる。また、内径 25 mm では 0.05 MPa 印加時からグラフの立ち上がりが見られるのに対して、内径 10 mm では 0.15 MPa 印加まで立ち上がりが見られない。これは、内径が小さいほど相対的にチューブの厚さが増すことで不感帯が増えるためであると考えられる。

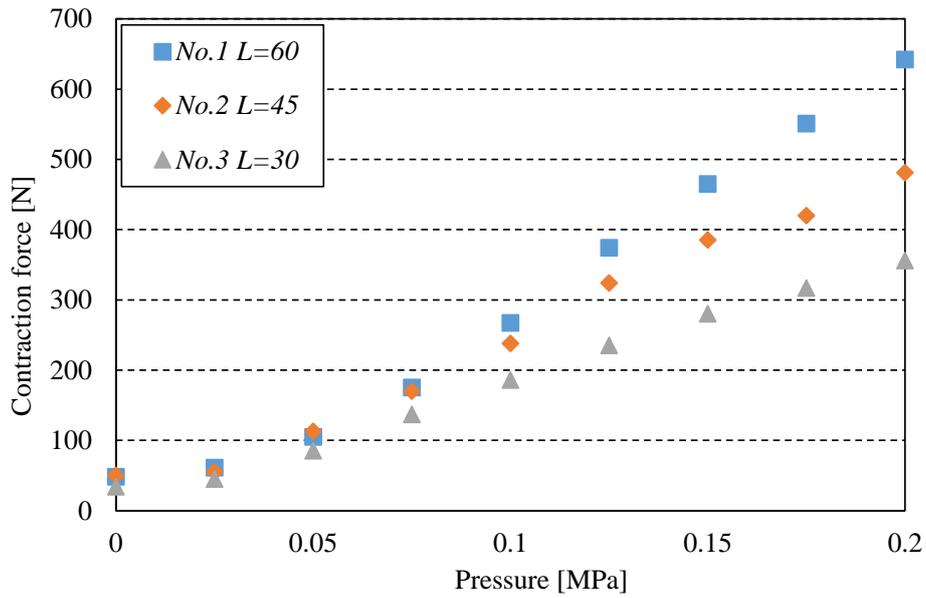


Fig. 4.12 Comparison of pressure and contraction force at various length

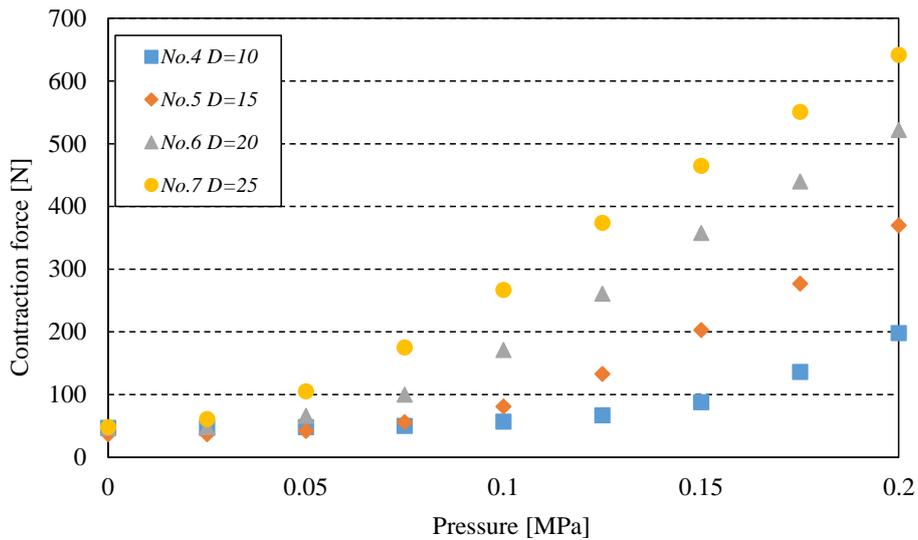


Fig. 4.13 Comparison of pressure and contraction force at various diameter

Table 4.5 Comparison of extension force at each inside diameter

Inside diameter [mm]	Axial area [mm ²]	Extension force at 0.2 MPa [N]
10	157	31.4
15	353	70.6
20	628	125.6
25	981	196.2

4.4.3 収縮率

図 4.14 に内径を 25 mm に固定して、稼動部長さを 30 から 60 mm に変化させた際の収縮率の測定結果を示す。収縮率は空気圧印加時の収縮量を収縮前の長さで割り求めている。等尺性収縮力の測定結果と同様に同一圧力ではリング間の長い方が(アスペクト比が大きい)収縮率が大きいという結果となった。これは、長さ L を大きくすることで受圧面積が増加したためであると考えられる。次に、長さを 60 mm に固定し、内径を 10 から 25 mm に変更した際の収縮率の測定結果を図 4.15 に示す。図 4.15 から、アスペクト比を大きくすることで、収縮率の立ち上がりが遅くなることがわかる。これは、アスペクト比が大きい方がゴムにかかるひずみが大きくなりその分ゴムの変形応力が大きくなる為であると考えられる。

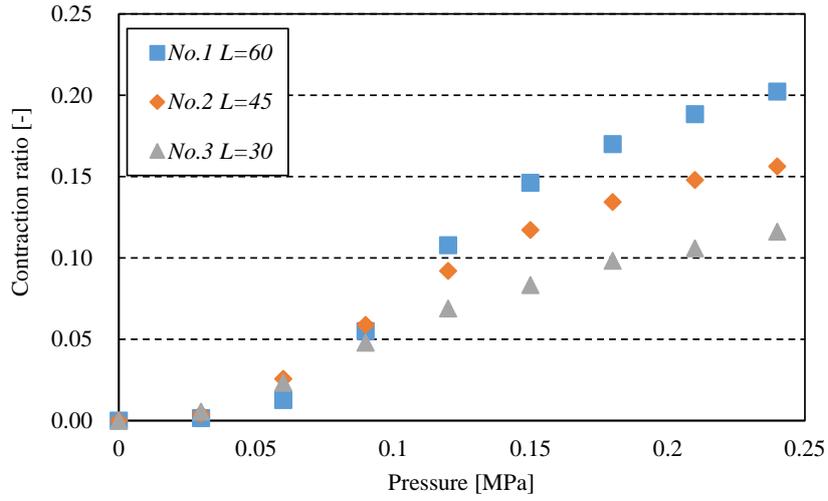


Fig. 4.14 Comparison of pressure and contraction ratio at various length

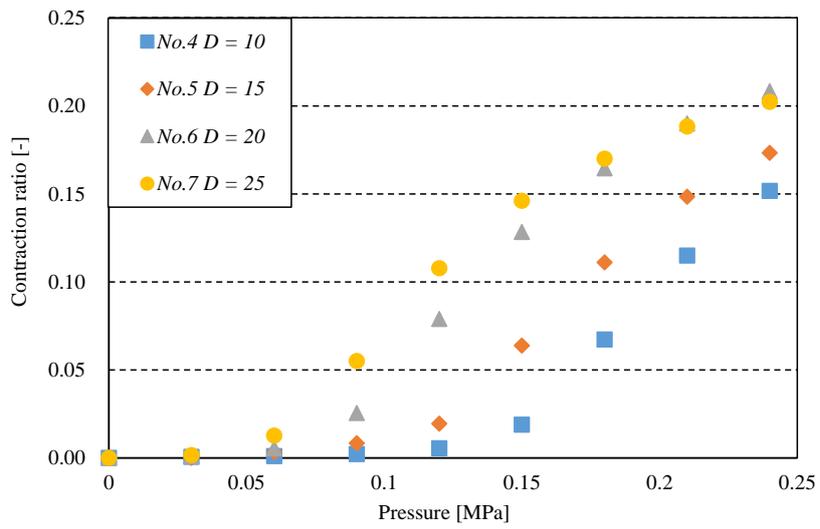


Fig. 4.15 Comparison of pressure and contraction ratio at various diameter

4.5 本章のまとめ

本章では、有限要素法の解析より伸びの目標を設定し、材料を開発した。次いで開発した材料を使用した軸方向繊維強化型人工筋肉でアスペクト比を変更し、疲労寿命の測定を行った。また、アスペクト比を変更した軸方向繊維強化型人工筋肉の出力特性を測定した。得られた結果を以下に示す。

- (1) FEM によるアスペクト比を変更した変形解析より、アスペクト比が小さくなるにつれて人工筋肉の収縮率とゴムにかかる最大ひずみが低下することがわかった。
- (2) 熱老化促進試験から経年劣化の予測を行った結果 1 年程度保管した人工筋肉でも収縮率 38% で使用できることがわかった。
- (3) アスペクト比を変更し、疲労寿命の試験を行った。その結果、疲労寿命の対数と膨張率には線形的な関係があり、使用状況により大まかな寿命の予測が可能であることがわかった。
- (4) アスペクト比を変更した際の特性試験から、同一内径では稼動部が長い方が収縮力及び収縮率が大きく、同様に同一稼動部長では内径が大きい方が、収縮力及び収縮率が大きいことがわかった。

第 5 章 与圧印加による長寿命化

第 5 章 与圧印加による長寿命化

5.1 天然ゴムの伸張結晶化

前章から、アスペクト比を小さくすることでゴムにかかるひずみを低減し、軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化を図ることができることがわかった。しかし、アスペクト比を小さくすることで収縮特性が低下するというデメリットがあることがわかった。そこで、本章では収縮特性を低下させずに長寿命化を図る手法として、ゴムの伸張結晶化特性に着目した。

5.1.1 天然ゴムの伸張結晶化

天然ゴムなどの一部のゴムは伸張によりゴムの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[56][57]。図 5.1 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[58]。

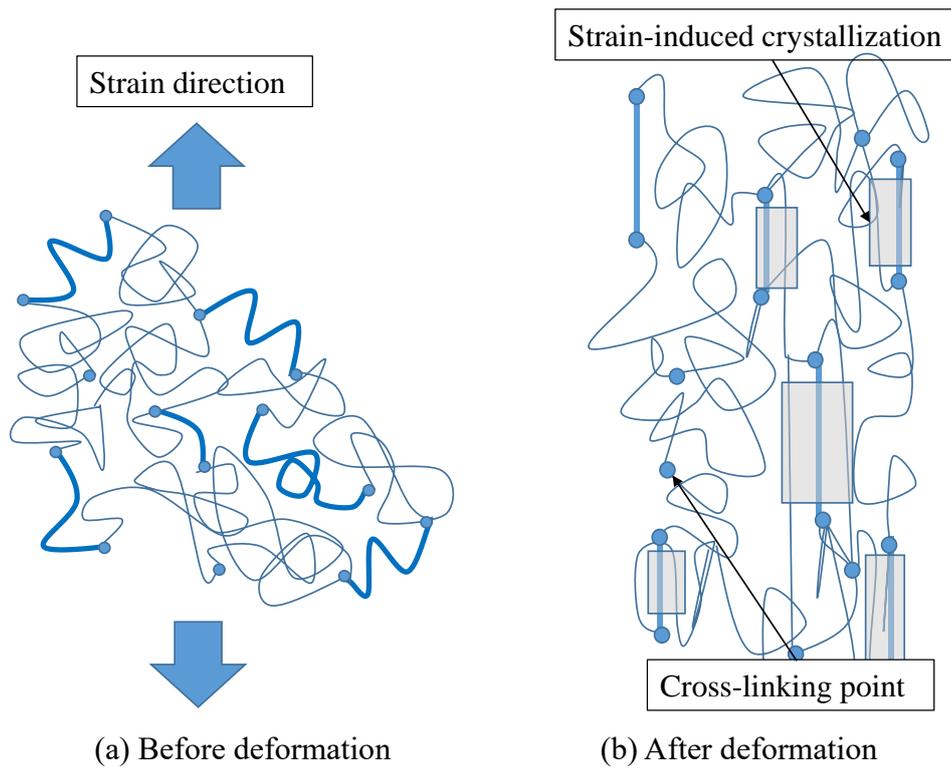


Fig. 5.1 Crystallization model of NR

5.1.2 伸張結晶層による亀裂伸展の阻害

1.4 節に示すように高分子の破壊プロセスは、外部荷重による局所的な分子鎖の切断(亀裂の発生)・亀裂の成長・最終的な破断・となっている(図 5.2)．亀裂の発生、成長のどちらかを抑制することができれば、長寿命化を図ることができると考えられる．本章では図 5.3 に示すようにゴムの伸張結晶化特性に着目し、結晶層により亀裂の成長を阻害し、軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化検討をした．

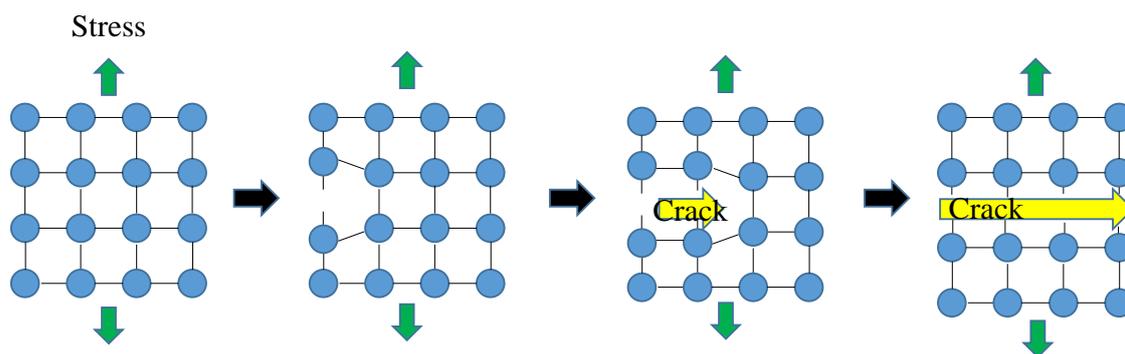


Fig. 5.2 Crack extension model

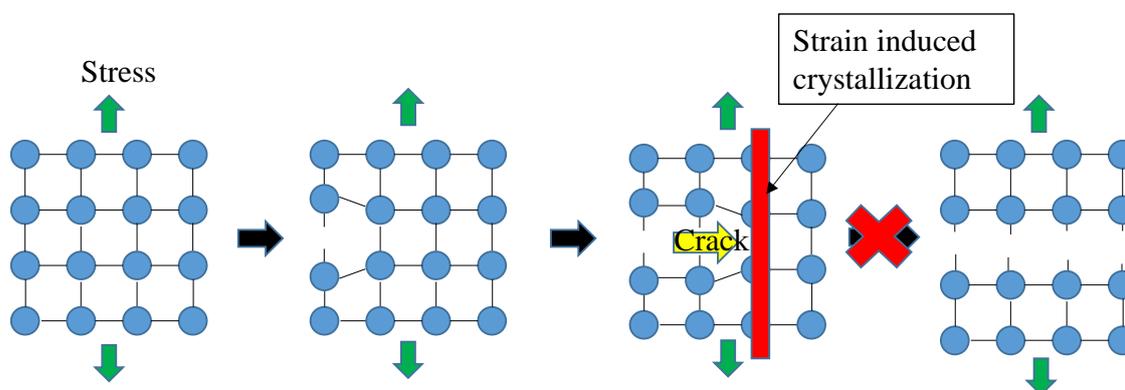


Fig. 5.3 Crack extension inhibition model

5.1.3 広角 X 線回折による伸張結晶層の測定

5.1.3.1 天然ゴムの応力ひずみ特性

図 5.4 に NR の応力ひずみ特性を示す。図中の赤い矢印は伸張過程及び収縮過程を示す。応力ひずみ特性は内径 20 mm, 外径 24 mm, 幅 10 mm のリング状試験片を万能引張り試験機 AUTOGRAPH AGS-J(SHIMADZU 製)を用いて 50 mm/min の速度で引張り, 求めた。NR の応力ひずみ特性は伸張過程と収縮過程で異なっている。伸張過程の応力に比べて収縮過程の応力は分子鎖間の摩擦などによるヒステリシスエネルギーの分だけ低下している。

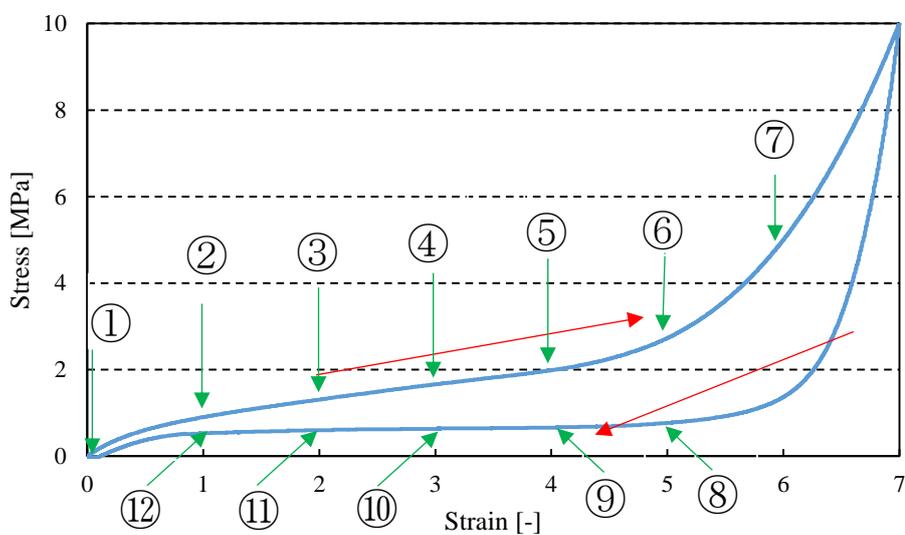


Fig. 5.4 Stress-strain characteristics of NR

5.1.3.2 広角 X 線回折測定

結晶は原子や分子が周期的かつ三次元的に繰返し並んだものであり，原子や分子の化学組成によってその物性が決定される．金属，セラミックス，高分子など身の回りにある多くの材料が微結晶から成る固体である．これらは単結晶に対して多結晶体と呼ばれる．多結晶からなる結晶性材料の強さや硬さなどの物性には，もっと大きなスケールで材料をなす，結晶の配向状態や結晶化度が関係している場合がある．X 線回折における結晶性高分子材料の評価は，およそ 1~100 nm の長周期構造に相当する小角 X 線散乱領域と，0.1 nm オーダーの原子と原子の間隔に相当する広角 X 線散乱領域に大別される．表 5.1 に X 線回折法から得られる情報と評価内容を示す[59]．

図 5.5 に X 線回折の測定原理を示す．試料に X 線を照射すると，散乱，回折された X 線は試料を頂点とした円錐形を描くように広がり，検出器によって強度が計測される．試料に含まれる分子や長周期の配向状態を視覚的に理解することができ，2次元回折像が得られた角度や幅を解析することで配向の方向や度合いを求めることができる．

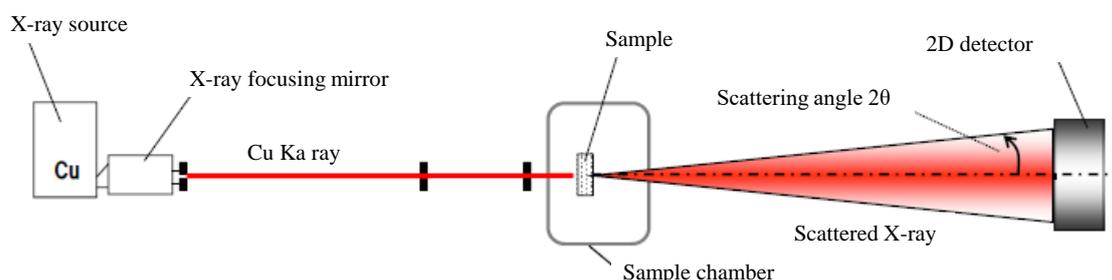


Fig. 5.5 Principle of X-ray diffraction measurement

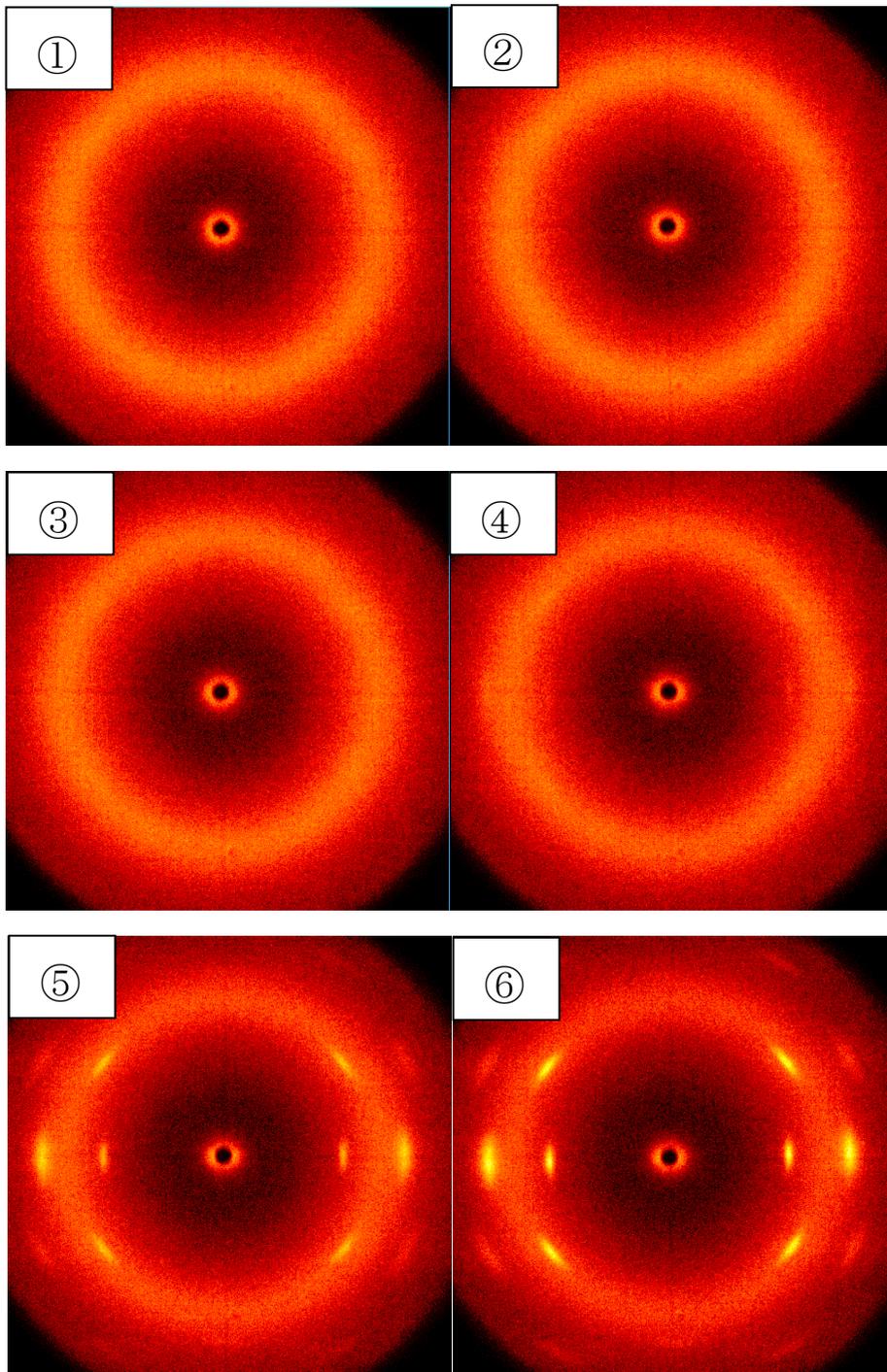
Table 5.1 Information and evaluation contents obtained from X-ray diffraction method[59]

	Information	Content of evaluation
Wide angle	Peak position, intensity	Crystal identification Crystal structure
	Peak width	Crystallite size Crystallite integrity
	Intensity decay at higher diffraction angles	The magnitude of the thermal motion of the molecule
	Relationship between the arrangement of date and the direction from which X-ray diffraction peaks	Presence of absence of orientation Degree of orientation Crystal orientation
	Intensity change in the tilt and in-plane direction of the sample	Degree of orientation Crystal orientation
	Ratio of integrated intensity between amorphous and crystalline peak	Crystallinity
	Intensity distribution of amorphous halo	Amorphous structure analysis
Small angle	Angle at which long-period peaks are obtained	Period of lamellar structure
	Relationship between sample arrangement and direction of long-period peak	Lamellar structure orientation
	Long-period peak spread	Disturbance of lamellar structure
	Center scattering spread, intensity distribution	Particle size and size distribution

図 5.6 に広角 X 線回折測定装置 NANO STAR(BRUKER 製, 日産アーク所有)を示す. X 線源は電圧 45 kV, 電流 120 mA で発生させた Cu-K α 線を用いた. 長さ 30 mm, 幅 10 mm, 厚さ 1 mm の天然ゴム製短冊状試験片を治具で固定し, 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. 一般に結晶層の形成は可逆的な反応であることが知られている[46]. ひずみは図 5.4 の①から⑫に示すように, 伸張過程, 収縮過程でひずみ 1 ごとに測定した. NR の測定結果を図 5.7 に, 比較として非結晶性であるスチレンブタジエンゴム (SBR) の測定結果を図 5.8 に示す. 図 5.4 から NR では伸張過程では⑤(ひずみ 4) から結晶層によるピークが観察されはじめ, ⑦(ひずみ 6)までひずみの増加に伴ってピーク強度が増加している. 収縮過程では⑩(ひずみ 3)まではピークが観察されたが, ⑪(ひずみ 2)ではピークが観察されなかった. また, 複数回の測定で結晶層の形成及び消失が可逆的であることを確認している. 非結晶性の SBR ではひずみを与えても結晶層によるピークは観察されなかった.



Fig. 5.6 Wide angle X-ray apparatus Nano STAR



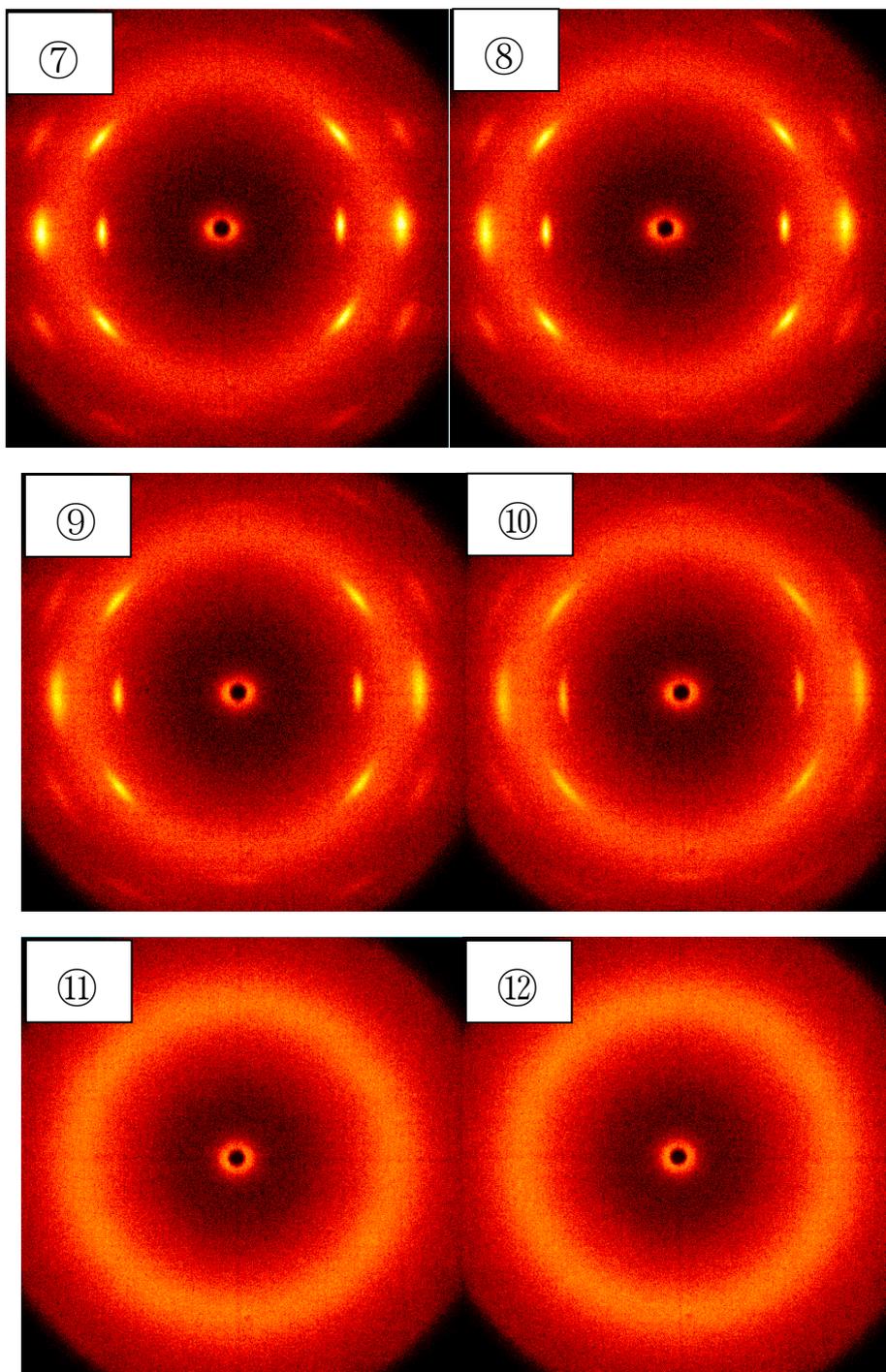


Fig. 5.7 Wide angle X-ray measurement of NR

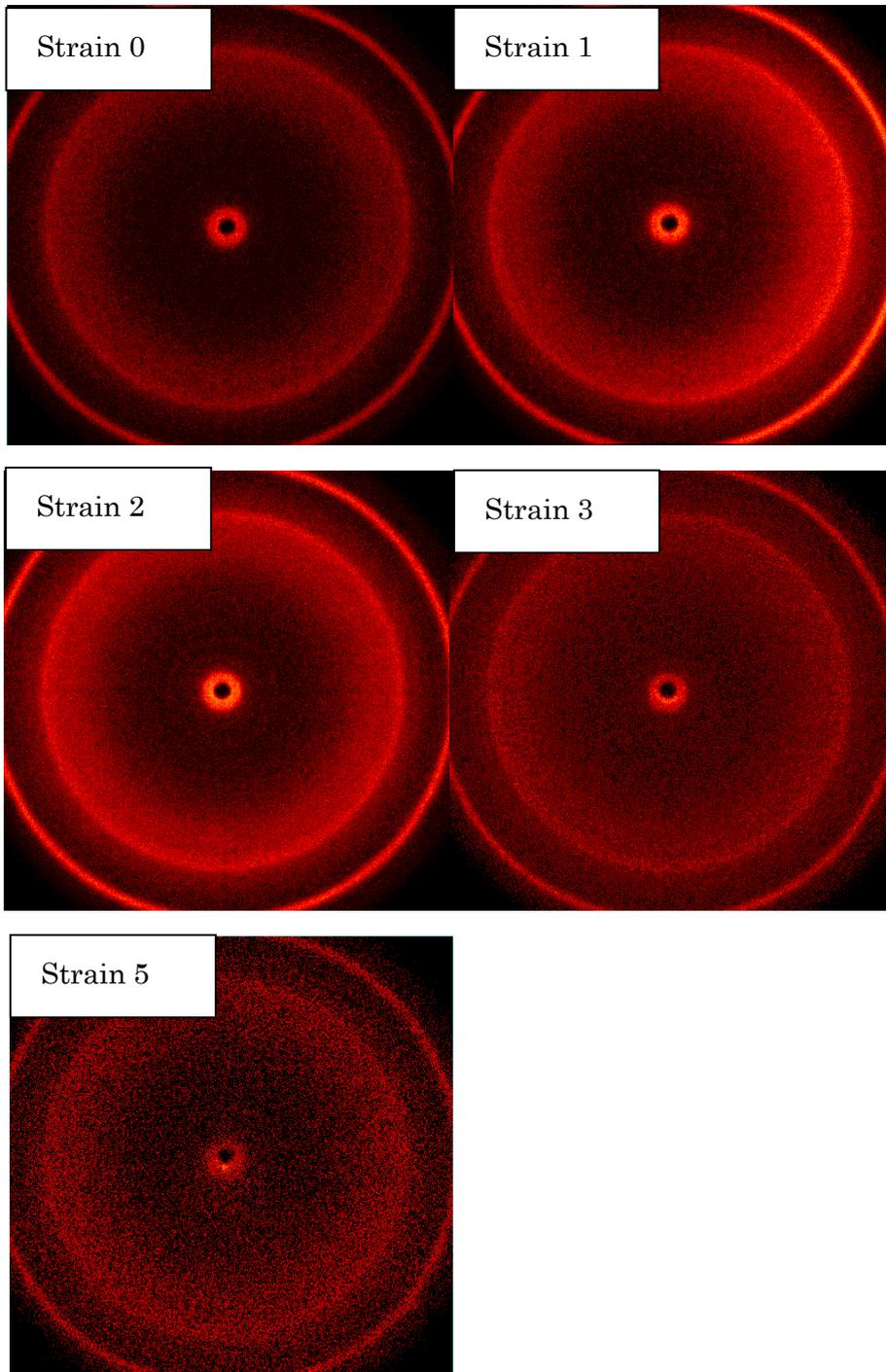


Fig. 5.8 Wide angle X-ray measurement of SBR

図 5.10 に天然ゴムの結晶化度の算出結果を示す。結晶化度は、回折強度曲線を結晶と非晶のピークに分離し、試料の全散乱体積に対する結晶の散乱体積比から式 5.1 を用いて算出した。また、図 5.9 にピークの分離例を示す。図中の曲線は上から全ピーク、非晶質及び結晶質のピークである。図より結晶質では $\theta = 13, 16.5, 19.5^\circ$ 付近でのピークが観察された。結晶化度はひずみ 6 のときに最大で 20%程度であった。

$$X_c = \frac{I_c}{I_c + I_a} \times 100 \quad (5.1)$$

X_c : 結晶化度 [%]

I_c : 物質の結晶質部分による散乱強度

I_a : 物質の非晶質部分による散乱強度

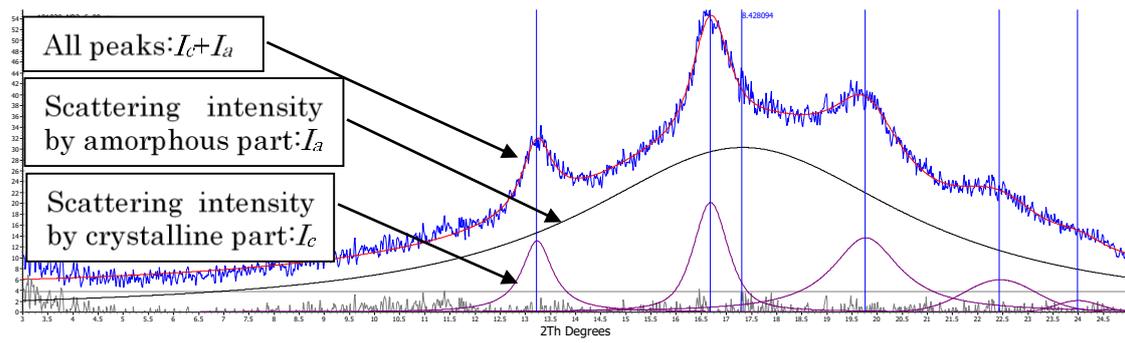


Fig. 5.9 Example of peak separation

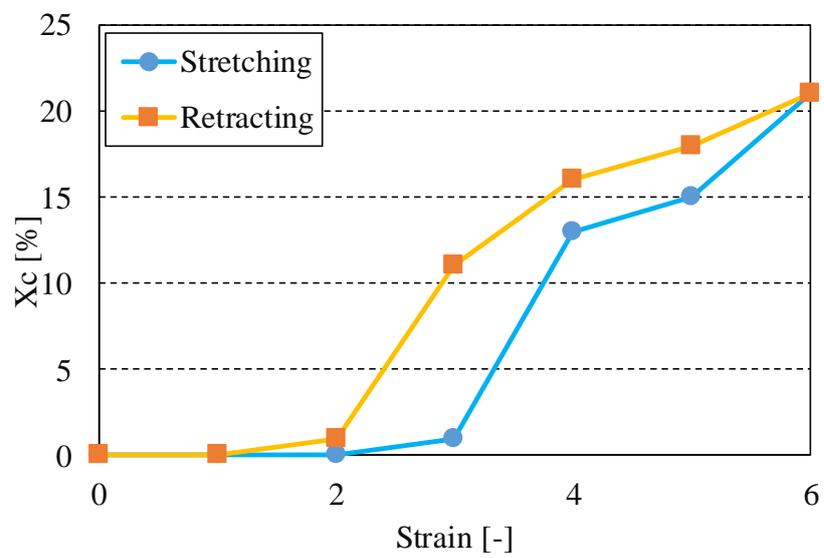


Fig. 5.10 Crystallinity calculation results

5.2 有限要素法解析

5.2.1 亀裂近傍のひずみ集中解析

5.1 節では広角 X 線回折により NR の伸張による結晶層形成の確認をした。その結果、伸張結晶化は可逆的な反応であり伸張結晶層を維持するにはひずみ 3 から 4 程度必要であることがわかった。しかし、実用上ひずみ 3 程度を維持することは難しい。一方、ゴムに亀裂がある場合、その亀裂近傍では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られる。しかし実際に亀裂近傍での結晶層形成を広角 X 線回折等で確認することは困難である。そこで、本節では亀裂を持ったゴムシートの有限要素法による解析を行い、局所的なひずみ集中の確認を行う。解析ソフトウェアとして、ANSYS15.0 を使用した。縦 50 mm, 横 20 mm, の平板中央に幅 0.01 mm, 長さ 0.01, 0.1, 1, 10 mm(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。実際の亀裂の形状は不明であるが、ゴムの伸張に伴い、亀裂は長さ方向にのみ伸展し、幅方向には伸展はないものとして上記形状とした。これを縦方向に 25 mm 伸張し、亀裂近傍でのひずみ集中の解析を行った。ゴムの材料モデルとして式 5.2 に示す Mooney-Rivlin を用い、天然ゴムの一軸引張り試験より材料定数を決定した ($C_{10}=0.09053$ MPa, $C_{01}=0.06034$ MPa)。図 5.11 に上記よりモデル化したゴム材料と実際のゴム材料の引張り試験結果を示す。ここで σ は応力, λ はひずみを示す。Mooney-Rivlin モデルはひずみ 4 以上の大変形時には実際のゴム材料の応力の立ち上がりを再現できないが、今回の解析ではそこまでの大変形ではないため問題ないとする。

図 5.13 に解析結果を示す。亀裂近傍ではマクロなひずみの数倍のミクロなひずみの集中が確認された。図 5.12 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。今回の亀裂幅 0.01 mm での解析結果からアスペクト比 100 程度(亀裂長さ 1 mm)まで亀裂が成長することで結晶層が形成されることがわかった。アスペクト比 100 以上に成長することで結晶層が形成され亀裂の伸展を抑制し長寿命化を図ることができる。

$$\sigma = \left(2C_{10} + \frac{2C_{01}}{\lambda} \right) \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (5.2)$$

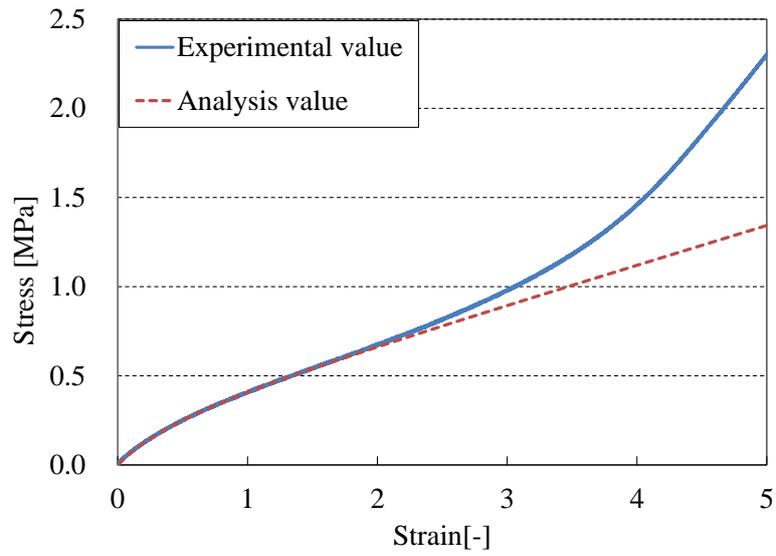


Fig. 5.11 Comparison of stress-strain characteristics of experiment and analysis

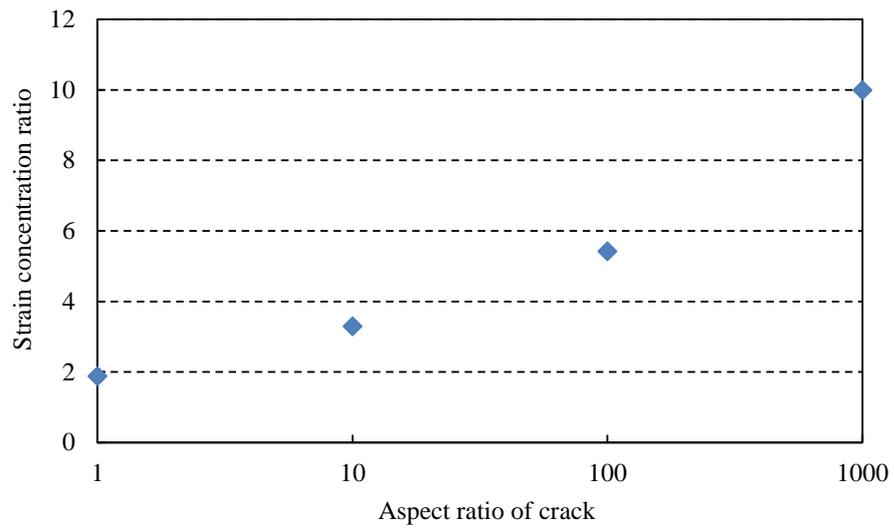
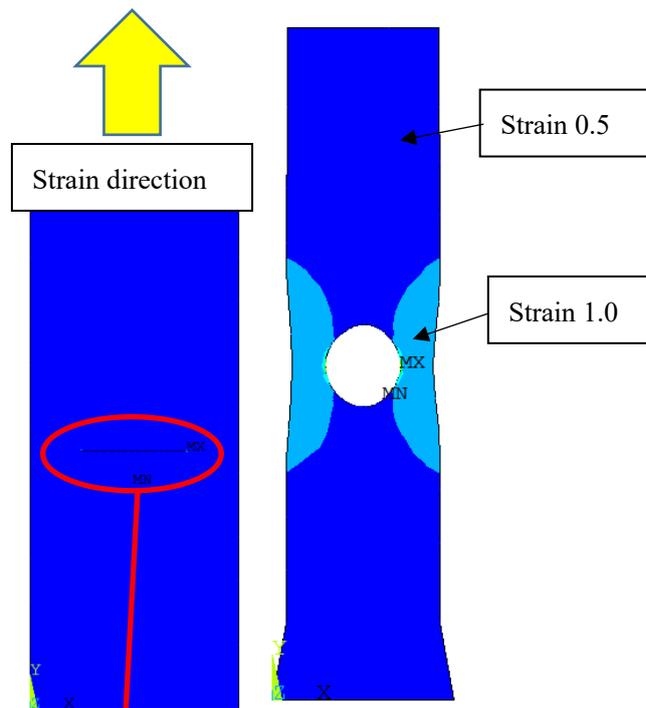
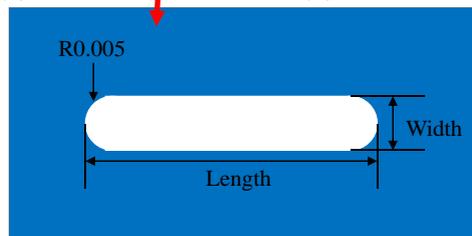


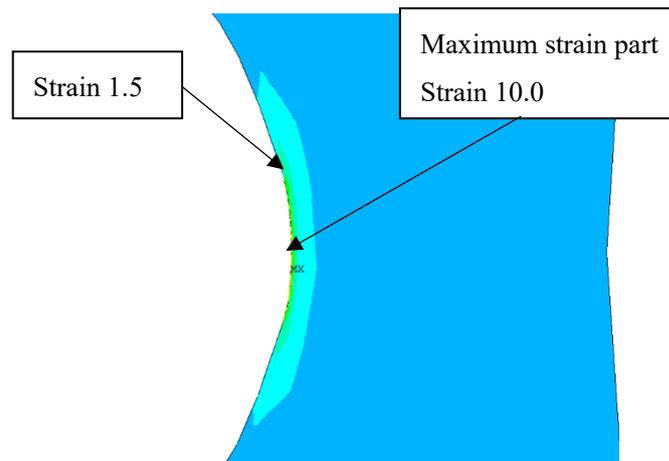
Fig. 5.12 Strain concentration analysis near the crack



(a) Before deformation (b) After deformation



(c) Enlarged view of slit part



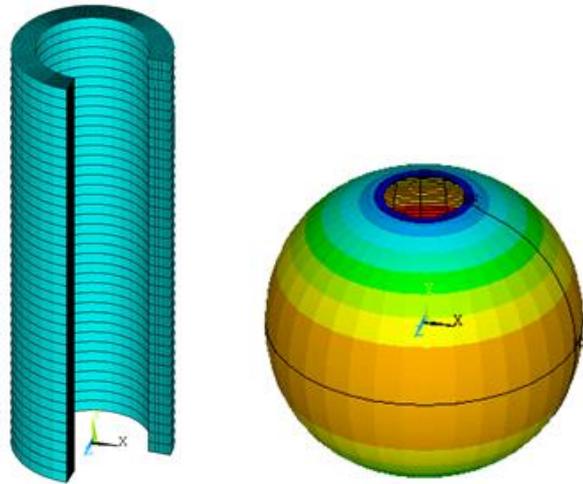
(d) Enlarged view near the crack

Fig. 5.13 Stress concentration analysis near the crack

ここで、実際の亀裂幅はほぼ 0 であると考えられるので、ひずみ集中率はより大きくなり、現実ではより早い段階から結晶層が形成されることが考えられる。また、破壊した軸方向繊維強化型人工筋肉の亀裂を測定したところ、平均で 3 mm 程度であった。これから、破壊が起こる前に結晶層が形成され亀裂伸展阻害に寄与できると考えられる。

5.2.2 人工筋肉の収縮率とひずみ解析

軸方向繊維強化型人工筋肉が収縮した際にゴムにどれだけのひずみが発生しているのかを把握するために、軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮率とゴムに発生する最大ひずみの関係を解析より求めた。図 5.14 のようにモデル化し内圧をかけて(b)のように変形させ、その際のひずみを算出した。図 5.15 に解析結果を示す。横軸は収縮率で縦軸はゴムの最大ひずみである。図 5.15 より今回の解析と同条件であるマクロなひずみ 0.5 を与えるには軸方向繊維強化型人工筋肉の最小収縮率を 2.5 %($R=0.05$ mm の場合)とすればよいことがわかった。



(a) Before deformation (b) After deformation

Fig. 5.14 FEM result of the straight-fiber-type artificial muscle deformation analysis

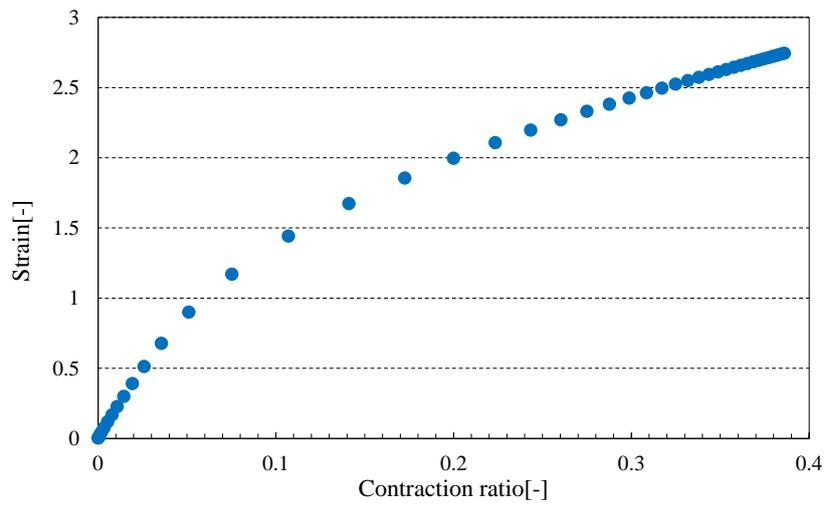


Fig. 5.15 Relationship between contraction ratio and strain

5.3 与圧印加による寿命評価

本節では、与圧印加による材料単体及び人工筋肉の疲労寿命への影響の確認を行う。

5.3.1 与圧印加による材料単体の繰返し引張り試験

5.1.3 項で広角 X 線回折により天然ゴムの伸張結晶特性の確認を行った。本項では材料単体での繰返し引張り試験を行い伸張結晶特性による長寿命化効果の確認を行う。試験装置概略を図 5.16 に示す。繰返し引張り試験は内径 20 mm、外径 24 mm のリング状試験片を用いて、試験片を所定のストロークまで繰返し伸縮させて破断するまでの回数を測定した。また、試験開始時のストロークを変化させることで、結晶層維持による効果の確認を行った。試験サンプルは伸張結晶性のある NR と伸張結晶性のない SBR を用いた。

試験結果を図 5.17 から 5.22 に示す。図 5.17 及び 5.18 の横軸は繰返しの伸縮回数であり、縦軸は最大ストロークである。また、図 5.19 及び 5.20 の横軸は繰返し伸縮回数であり、縦軸は真応力の応力振幅である。SBR の試験結果である図 5.18 及び 5.20 ではどちらも同様に右肩下がりのグラフとなっている。つまり、最大ストローク及び真応力の応力振幅が増加するにつれて疲労寿命は短くなっている。これは一般の金属材料などの特性と同様である。一方で、NR の試験結果である図 5.17 及び 5.19 ではどちらも同様に右肩上がりのグラフとなっている。つまり、最大ストローク及び真応力の応力振幅が増加するにつれて疲労寿命が長くなっている。これは最大ストローク及び真応力の応力振幅が増加することで伸張結晶層が形成されて、亀裂の伸展を阻害することで疲労寿命が延びたものであると考える。また、図 5.21 及び 5.22 の横軸は繰返し伸縮回数であり、縦軸はひずみである。これも同様に、NR では同一ひずみでは初期ストロークが大きいほど疲労寿命が長くなっている一方で、SBR では同一ひずみでは初期ストロークが大きいほど疲労寿命が短くなっていることがわかる。

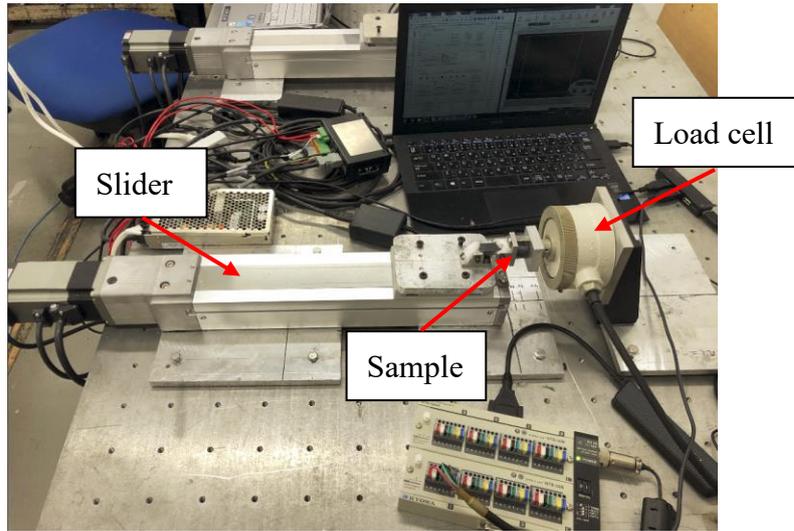


Fig. 5.16 Test equipment overview

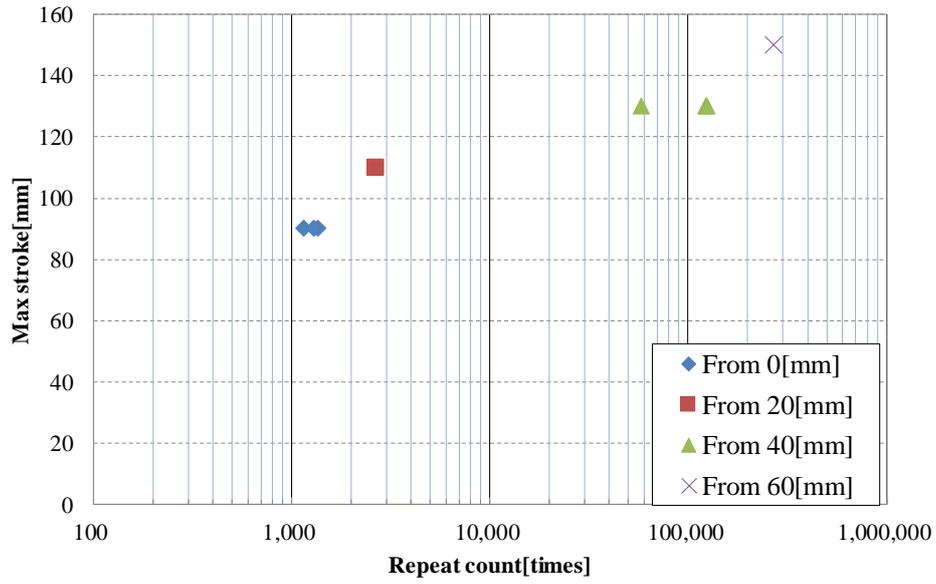


Fig. 5.17 Material fatigue life test
(NR, Stroke 90 mm fixed, Repeat count and max stroke)

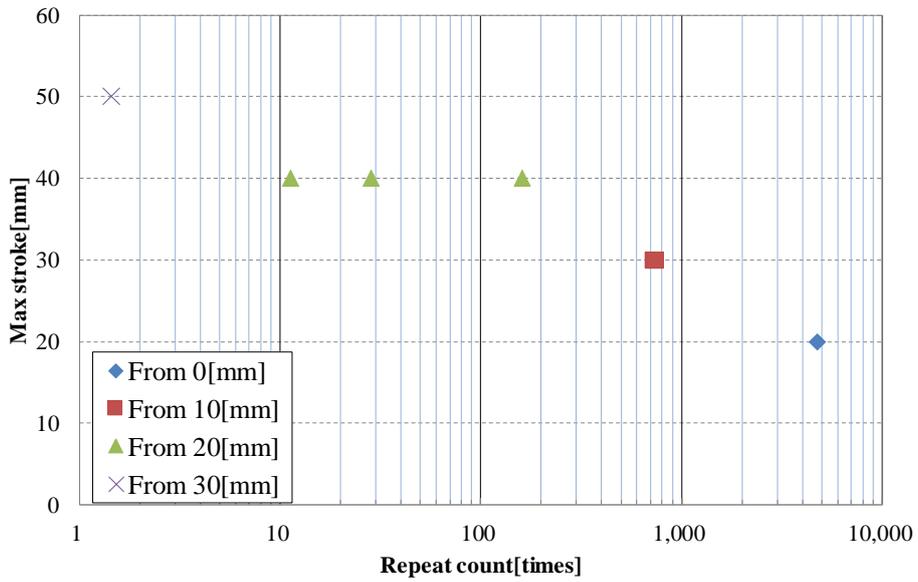


Fig. 5.18 Material fatigue life test
(SBR, Stroke 20 mm fixed, Repeat count and max stroke)

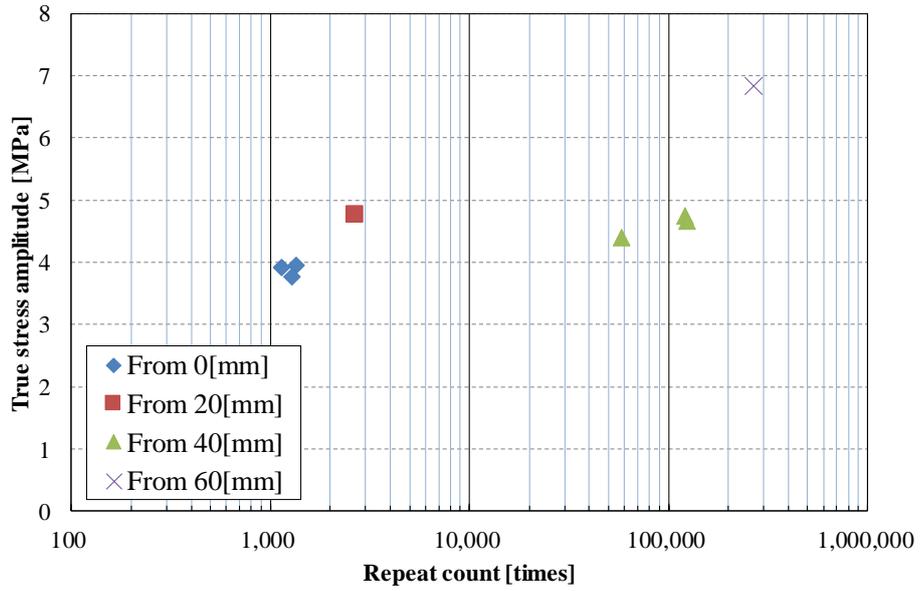


Fig. 5.19 Material fatigue life test
(NR, Stroke 90 mm fixed, Repeat count and true stress amplitude)

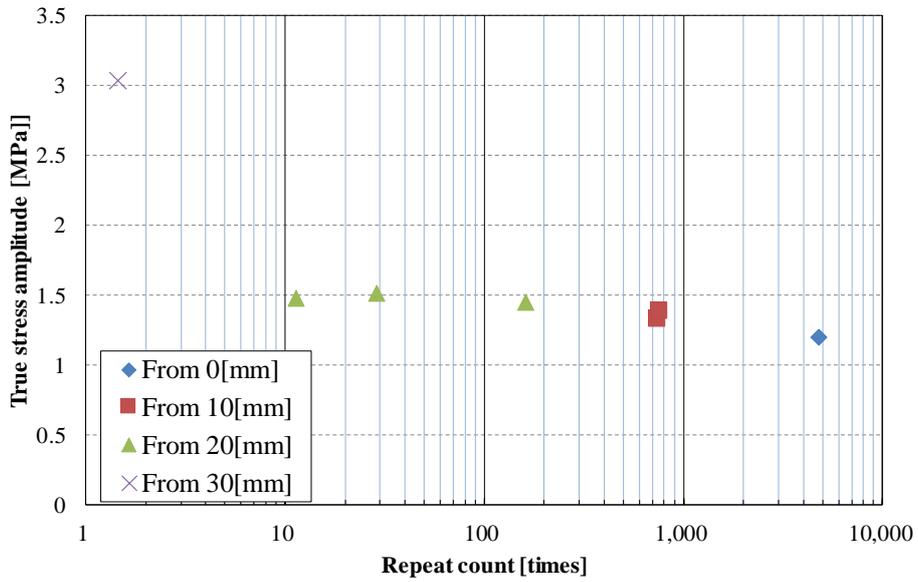


Fig. 5.20 Material fatigue life test
(SBR, Stroke 20 mm fixed, Repeat count and true stress amplitude)

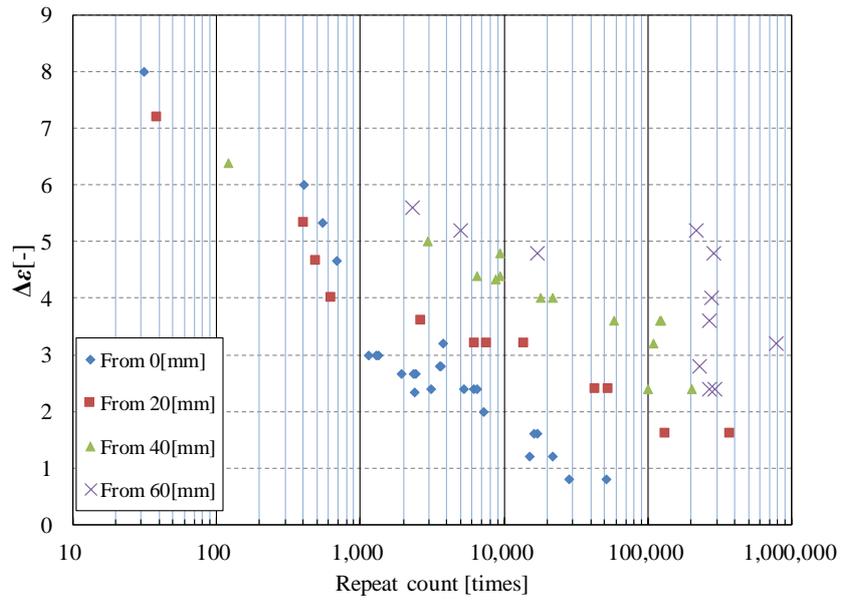


Fig. 5.21 Material fatigue life test (NR, Repeat count and strain)

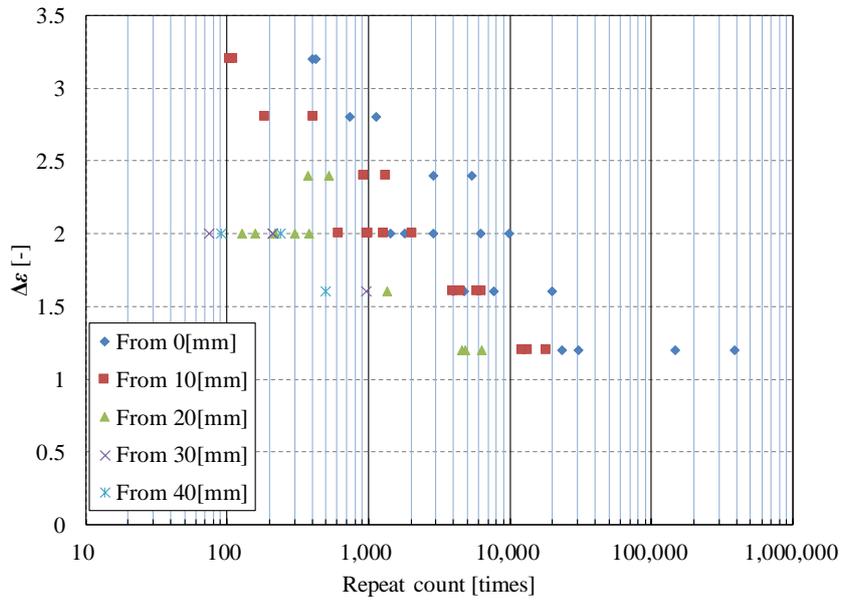


Fig. 5.22 Material fatigue life test (SBR, Repeat count and strain)

5.3.2 与圧印加による人工筋肉の寿命評価

伸張結晶化による軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化効果を確認するために耐久性試験を実施した。伸張結晶性のある NR と伸張結晶性のない SBR で作製した軸方向繊維強化型人工筋肉を用い、伸張結晶性の有無による疲労寿命への影響の確認を行った。耐久性試験は、予め最低収縮率及び最高収縮率となる圧力を測定し、その圧力を 6 秒周期で印加し、軸方向繊維強化型人工筋肉が破壊するまでの伸縮回数を測定した。ここで、本試験における破壊とは亀裂の発生、成長などにより、6 秒周期で所定の伸縮動作ができなくなる状態をさす。図 5.23 に試験装置の外観を、表 5.2 に試験サンプルの詳細を示す。ゴム材料は NR 及び SBR を用いた。内径 20 mm、外径 24 mm、長さ 80 mm の軸方向繊維強化型人工筋肉を作製し、収縮率を 0-20% 及び 2.5-22.5% の範囲で稼動させて、破壊するまでの繰返し伸縮回数を測定した。試験結果を図 5.24 に示す。試験は各 5 回行い、平均値、最大値及び最小値を示した。図 5.24 より収縮率 0-20% での耐久性は NR と SBR に大きな差は見られないが、収縮率 2.5-22.5% では NR の方が大幅に長寿命であった。これは、NR の応力ひずみ関係より、NR は初期の応力の立ち上がりが急激であることから、その範囲を避けることにより応力の振幅が低減され寿命が向上したとも考えられる。しかし、同様の応力ひずみ関係を持つ SBR では寿命の向上が見られないことから、応力振幅の低減による影響ではなく、伸張結晶化により亀裂先端に結晶層が形成され、亀裂の成長が抑制されたものであると考える。

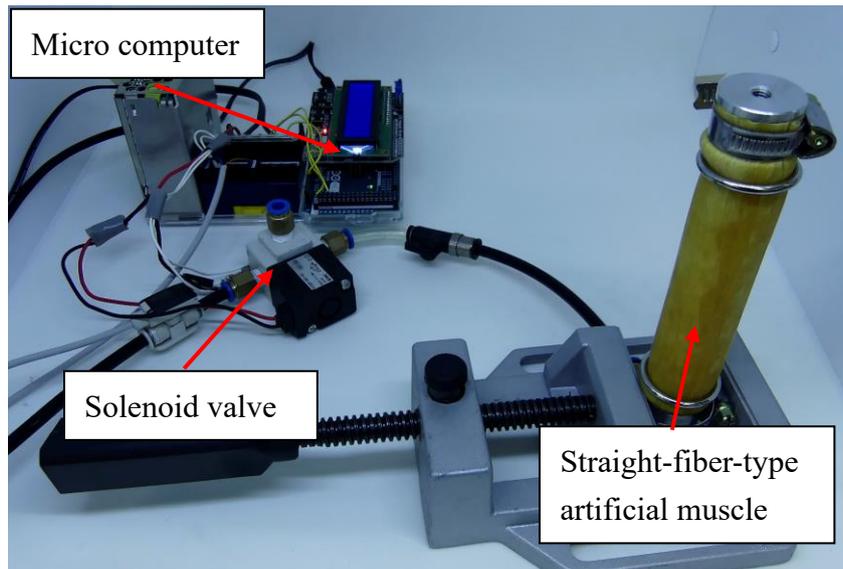


Fig. 5.23 Experimental setup of fatigue life test

Table 5.2 Sample specification

No.	1	2	3	4
Rubber	NR	NR	SBR	SBR
Inside diameter [mm]	20	20	20	20
Outside diameter [mm]	24	24	24	24
Length [mm]	80	80	80	80
Aspect ratio [-]	4	4	4	4
Contraction range [%]	0-20	2.5-22.5	0-20	2.5-22.5
Max applied pressure [MPa]	0.19	0.20	0.15	0.16
Min applied pressure [MPa]	0	0.04	0	0.03

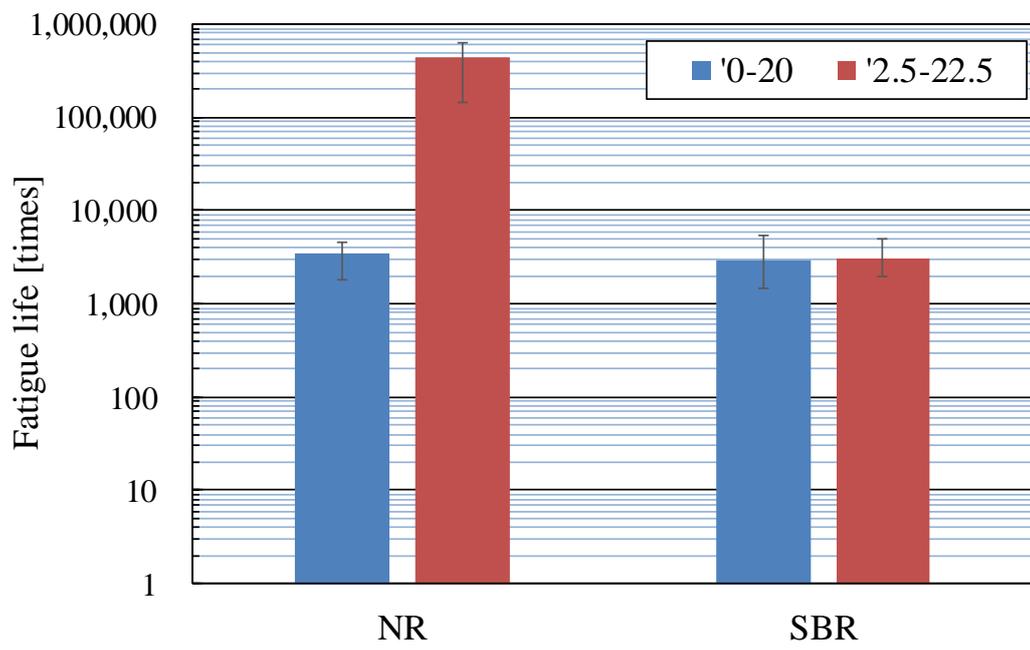


Fig. 5.24 Results of fatigue life test

5.4 与圧印加による収縮特性評価

前節より、与圧を印加することでゴムの伸張結晶層を維持し、長寿命化を図ることができた。しかし、軸方向繊維強化型人工筋肉は自然長時に最も収縮力を発揮できることが知られているため、与圧を印加することで収縮特性が低下することが考えられる。そのため本節では軸方向繊維強化型人工筋肉の与圧印加の有無で等尺性収縮力の測定を行った。試験装置を図 5.25 に、測定結果を図 5.26 に示す。

図 5.26 より、与圧を 0.04 MPa 印加することで等尺性収縮力が低下し、0.2 MPa 印加時には 30 %程度低下することがわかった。これは、与圧を印加することで人工筋肉が半径方向に膨張し、それにより形状が変化したためであると考えられる。

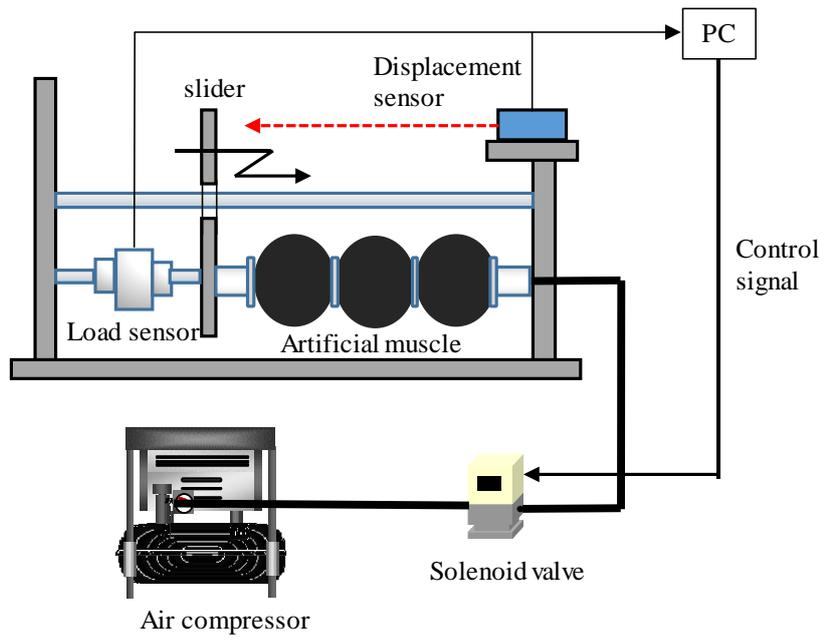


Fig. 5.25 Experimental setup of contraction force

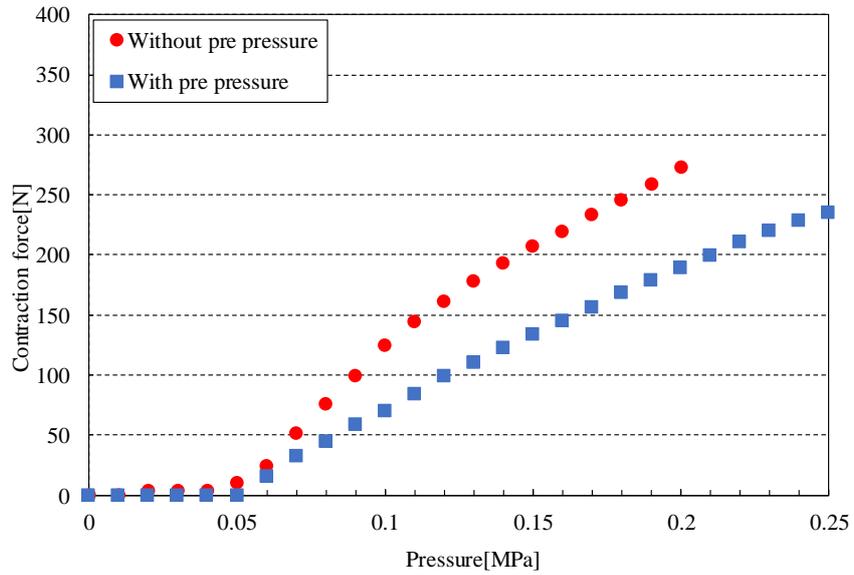


Fig. 5.26 Comparison of contraction force with and without pre pressure(0.04 MPa)

5.5 本章まとめ

本章では、ゴムの伸張結晶化特性による亀裂進展阻害に着目して、人工筋肉の長寿命化検討を行った。はじめに広角 X 線による結晶層の測定を行った。次に、有限要素法解析により亀裂近傍でのひずみ集中の解析を行った。その後、伸張結晶化特性を利用したゴム材料及び人工筋肉の疲労寿命試験を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 広角 X 線回折から天然ゴムの伸張による結晶層の形成を確認した。今回の天然ゴム材料では、伸長過程ではひずみ 4 から結晶層が形成され収縮過程ではひずみ 3 までピークが観察された。また、結晶化度は最大で 20%程度であった。
- (2) FEM 解析から亀裂近傍ではひずみの集中が発生しており、亀裂が成長するにつれてひずみの集中率も大きくなることがわかった。
- (3) ゴム材料の繰返し引張試験から、結晶性のある NR では同一ひずみでは初期ストロークが大きくなるにつれて疲労寿命が長くなる一方で、結晶性のない SBR ではストロークが大きくなるにつれて疲労寿命が短くなった。
- (4) 伸張結晶層を維持する条件で疲労寿命試験を行うことで通常の 100 倍程度の長寿命化を図ることができた。

第6章 長寿命かつ高出力を目指した くびれ型人工筋肉の提案

第 6 章 長寿命かつ高出力を目指したくびれ型人工 筋肉の提案

本章では、ゴムの伸張結晶化による長寿命化効果を利用しながら、収縮特性を低下させない手法として、中央部をくびれさせた形状の人工筋肉の提案をする。提案手法の有効性を確認するため、寿命及び収縮特性の評価を行う。

6.1 概要

5 章から、ゴムに常に一定以上のひずみがかかる状態を維持することで軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化を図れることがわかっている。これまでは、ひずみを維持するために伸長時(空気圧排出時)でも空気圧を 0 としない方法(与圧印加)で稼働させていた。しかし、本方式では、伸長時にも圧力が印加されて軸方向繊維強化型人工筋肉が半径方向に膨張した形状となっており、印加圧力の軸方向成分が増加し収縮力の低下が見られた。

そこで、伸張結晶化による長寿命化効果を維持しつつ、収縮力を低下させないくびれ型人工筋肉の提案を行う。図 6.1 にくびれ型人工筋肉の概要を示す。くびれ型人工筋肉は通常形状の軸方向繊維強化型人工筋肉に口径の大きなターミナルを取り付けることで端部を拡張し、中央がくびれた形状としている。これに空気圧を印加することで中央部が膨張して、フラットな形状となる。さらに空気圧を印加することで通常形状の軸方向繊維強化型人工筋肉と同様に半径方向に膨張して、軸方向に収縮する。この状態で繰り返し動作させることで与圧印加による長寿命化効果とフラット形状による高収縮力を併せ持った人工筋肉の動作が可能になると考える。

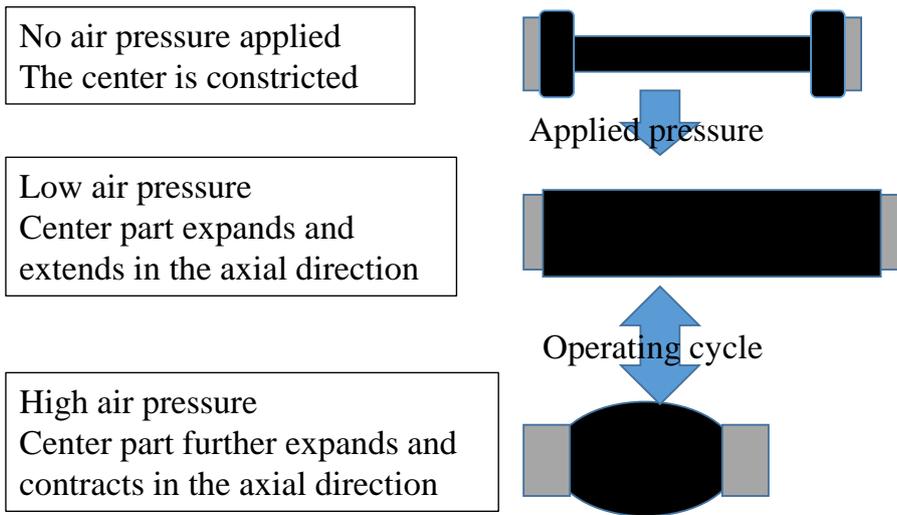


Fig. 6.1 Artificial muscle overview

6.2 寿命評価

本節ではくびれ型人工筋肉の寿命評価を行う。耐久性試験は、予めフラット形状となる圧力及び収縮率 20 %となる圧力を測定して、その圧力を 6 秒周期で印加し、人工筋肉が破壊するまでの繰返し回数を測定した。図 6.2 に試験装置外観を表 6.1 に試験サンプルの詳細を示す。ゴムは NR を使用し、内径 10 mm、外径 16 mm、長さ 55 mm の軸方向繊維強化型人工筋肉を作製し、収縮率を 0-20 %の範囲で稼動させて、破壊するまでの回数を測定した。試験結果を図 6.3 に示す。比較として与圧を印加した場合の耐久性試験結果を示す。図よりくびれ型人工筋肉でも与圧を印加することで、長寿命化を図ることが可能となっている。

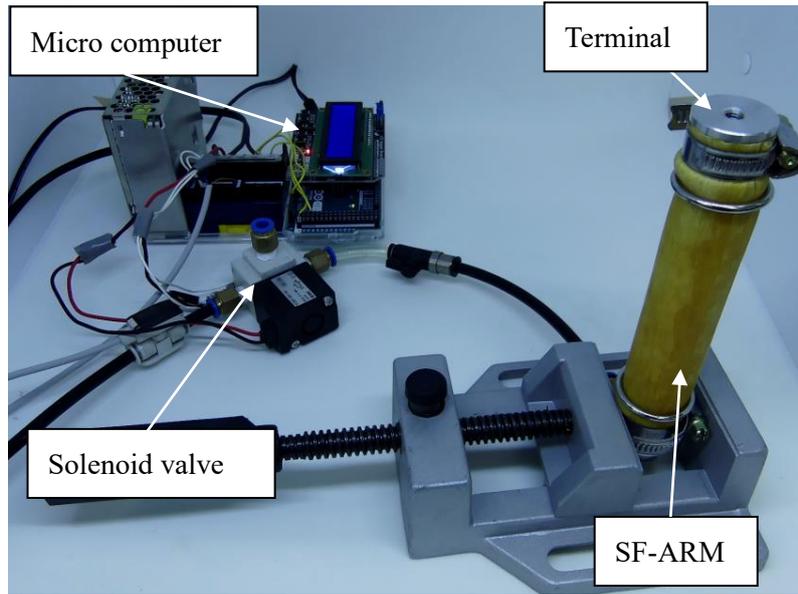


Fig. 6.2 Experimental setup for fatigue life test

Table 6.1 Sample specification

No.	1	2	3	4
Rubber	NR	NR	NR	NR
Terminal size [mm]	10	10	20	20
Pre pressure [MPa]	0	0.03	0	0.05
Inside diameter [mm]	11			
Outside diameter [mm]	16			
Length [mm]	55			
Aspect ratio [-]	5			
Contraction range [%]	0-20	2.5-22.5	0-20	0-20
Number of samples	3	3	3	1

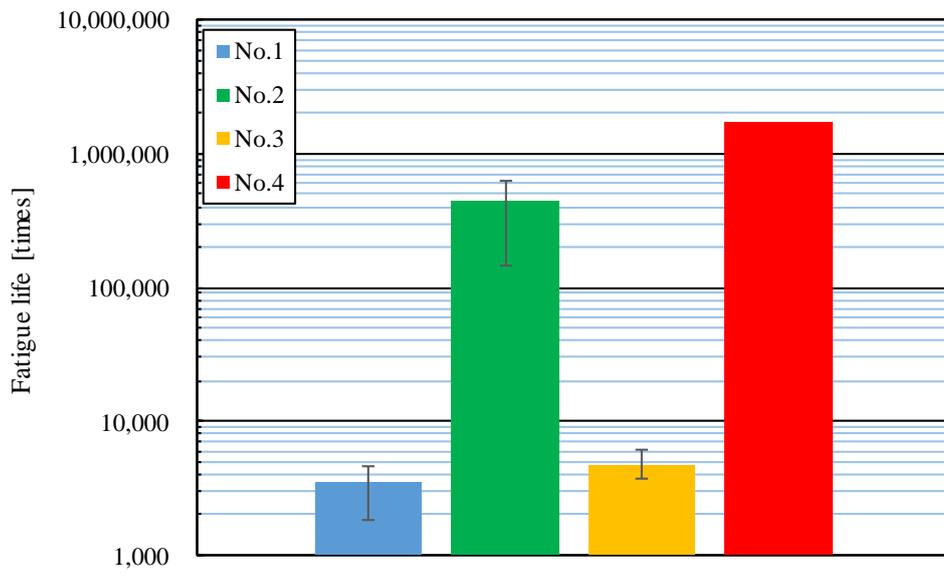


Fig. 6.3 Results of fatigue life test

6.3 収縮特性評価

6.3.1 収縮率測定

本節では、くびれ型人工筋肉の収縮特性の評価を行う。はじめに収縮率の測定を行った。収縮率の測定は空気圧を 0 MPa から 0.01 MPa ずつ印加して、その際の収縮量の測定を行った。試験装置を図 6.4 に試験結果を図 6.5 及び 6.6 に示す(図 6.5 中の a~c は図 6.6 の各状態を示す)。試験結果からくびれ型人工筋肉ははじめ伸長し(収縮率マイナス)、その後収縮した(収縮率プラス)。くびれ型人工筋肉ははじめ補強繊維がたるんだ状態となっており、これに空気圧を印加することで補強繊維のたるみが解消され軸方向に伸長する。その後は通常軸方向繊維強化型人工筋肉と同様に半径方向に膨張して、軸方向に収縮する。

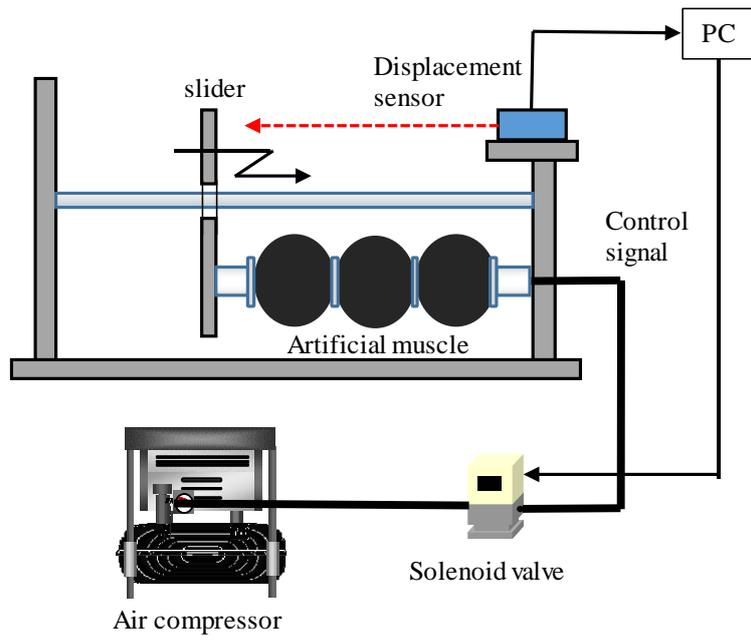


Fig. 6.4 Experimental setup for contraction ratio measuring

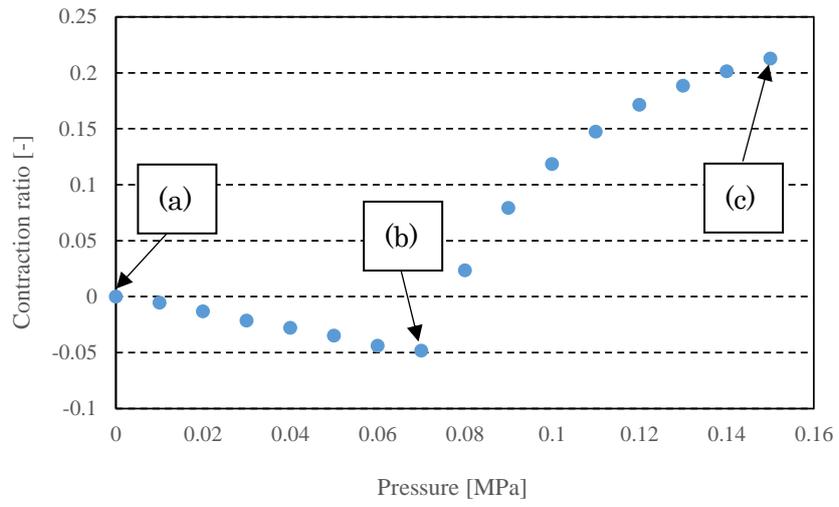


Fig. 6.5 Measurement results of contraction ratio of the artificial muscle



(a) Natural length of artificial muscle



(b) Low pressure



(c) High pressure

Fig. 6.6 Artificial muscle contraction

6.3.2 収縮力測定

本項ではくびれ型人工筋肉の等尺性収縮力の測定を行った。試験装置の概略を図 6.7 に示す。試験サンプルは 6.3 節の表 6.1 と同様である。試験結果を図 6.8 に示す。なお試験結果は収縮力が比較しやすいように与圧印加時の初期収縮力を補正している。試験結果から、No.1(通常人工筋肉与圧なしの場合)と No.3(くびれ型人工筋肉の与圧なしの場合)は同等であり、No.2(通常人工筋肉の与圧ありの場合)は低く、No.4(くびれ型人工筋肉の与圧ありの場合)は高かった。No.1(通常人工筋肉)及び No.3(くびれ型人工筋肉の与圧なしの場合)は通常の内径 10 mm の軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮力であり、No.2(通常人工筋肉の与圧ありの場合)は与圧を印加することで半径方向に膨張して収縮力が低下したものであると考える。No.4(くびれ型人工筋肉の与圧ありの場合)は通常時にくびれ形状とすることで与圧印加時にフラットな形状となるため、通常人工筋肉の与圧ありの場合のような形状の変化による収縮力の低下が起こらない。また、口径の大きなターミナルを取り付けることで見かけ上内径が大きくなっているため半径方向の受圧面積が増加して、収縮力が増加したものであると考える。

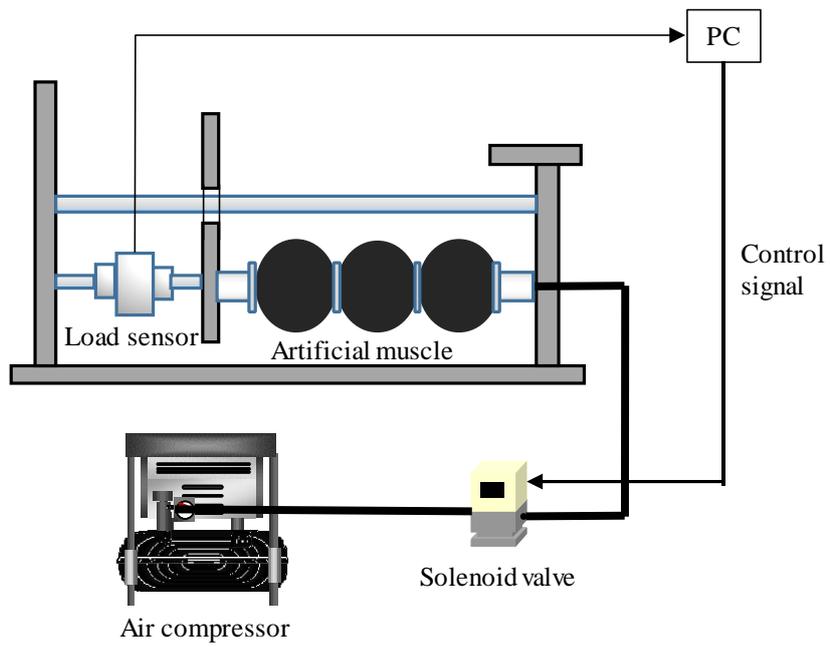


Fig. 6.7 Outline of isometric contraction force measuring device

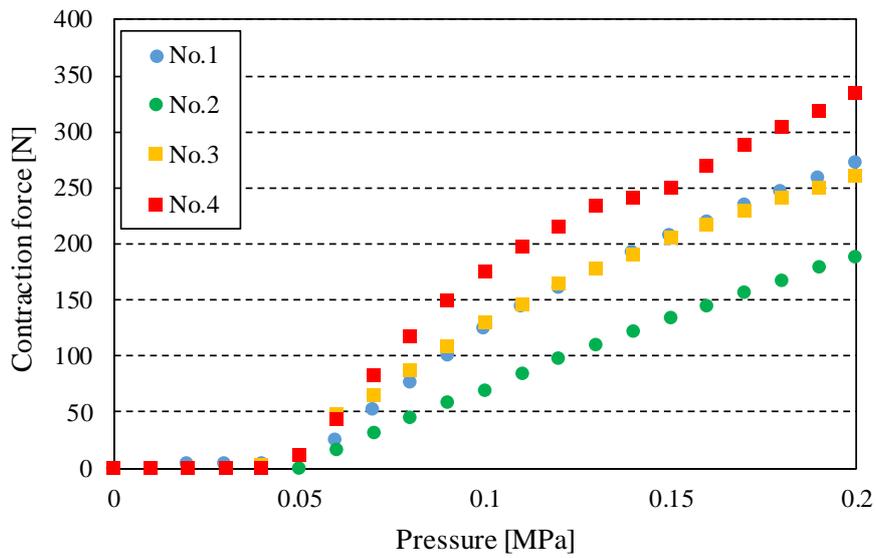


Fig. 6.8 Results of isometric contraction force measurement

6.4 本章まとめ

本章では長寿命かつ高出力を目指したくびれ型人工筋肉の提案をして、疲労寿命及び収縮特性の評価から、有用性の確認を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) くびれ型人工筋肉の疲労寿命試験から、伸張結晶化による長寿命化効果を確認した。くびれ型人工筋肉でも与圧印加により最大で 100 万回を超える疲労寿命を確認した。
- (2) 等尺性収縮力の測定から、くびれ型人工筋肉は通常時にくびれ形状とすることで通常人工筋肉の与圧ありの場合のような形状の変化による収縮力の低下が起こらない。また、口径の大きなターミナルを取り付けることで見かけ上内径が大きくなっているため、収縮力が増加していることを確認した。

第7章 結論と今後の展望

第 7 章 結論と今後の展望

7.1 結論

本論文では、軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化を目標とし、軸方向繊維強化型人工筋肉の破壊のメカニズムの解明及び疲労寿命の向上を行った。

第 1 章では、まず既存のソフトアクチュエータについて述べた。次いで、人工筋肉及びゴム材料の寿命に関する既存研究及び高分子の破壊について述べた。

第 2 章では、軸方向繊維強化型人工筋肉について述べた。軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮メカニズム、収縮特性、作製方法について述べた。

第 3 章では、軸方向繊維強化型人工筋肉の特性と破壊メカニズムについて述べた。まず、ゴム材料をモデル化し、次いで人工筋肉の変形解析を行った。最後に破壊メカニズムについて述べた。

第 4 章では、アスペクト比を変更した際の寿命及び収縮特性への影響評価について述べた。まず、FEM により変形解析を行い、ゴム材料開発の目標値として設定した。次にゴム材料の開発を行った。その後、アスペクト比を変更した寿命の評価及び収縮特性の評価を行い、疲労寿命と収縮特性のトレードオフの関係を見出した。

第 5 章では、NR の伸張結晶化特性に着目した長寿命化に取り組んだ。まず、広角 X 線回折により伸張結晶層の形成を確認した。次いで、伸張結晶層を利用した寿命の評価を行い、通常の 100 倍程度の長寿命化効果を確認した。しかし、与圧印加による収縮力の低下が発生した。

第 6 章では、長寿命、高出力を目指してくびれ型人工筋肉の提案を行った。まず、くびれ型人工、筋肉の寿命評価を行い、長寿命であることを確認した。次いで、収縮力の測定を行い、通常の与圧印加と比較して高出力であることを確認した。

本論文での成果は大変形を受けるゴム材料の長寿命化であり、軸方向繊維強化型人工筋肉以外にも応用できる可能性がある。

7.2 今後の展望

本論文では、ゴムの伸張結晶化特性を利用した亀裂進展阻害による空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化検討を行った。広角 X 線回折による結晶層形成の確認及び結晶性の有無による寿命の比較から、今回の長寿命化効果は結晶層形成によるものであると考えられるが、実際の亀裂近傍での結晶層形成を顕微鏡、広角 X 線等で確認を行う。

今後は本論文での成果を軸方向繊維強化型人工筋肉の様々なアプリケーションに適用していく。また、軸方向繊維強化型人工筋肉以外の大変形を受けるゴム材料への適用検討を行う。

参考文献

- [1] “平成 23 年版労働経済の分析-世代ごとにみた働き方と雇用管理の動向-, 第 1 章 労働経済の推移と特徴, 第 1 節 雇用、失業の動向”, 厚生労働省労働経済白書, <http://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/roudou/11/>, 2017.
- [2] “2025 年に向けた介護人材にかかる需給推計 (確定値) について”, 厚生労働省プレスリリース, 平成 27 年 6 月 24 日.
http://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-12004000-Shakaiengokyoku-Shakai-Fukushikibanka/270624houdou.pdf_2.pdf, 2017.
- [3] 日本船舶技術研究協会, “造船所へのパワーアシストスーツの適用可能性に関する調査研究”, <http://www.mlit.go.jp/common/001093745.pdf>, 2017.
- [4] 日本政策投資銀行, “わが国介護ロボット作業の発展に向けた課題と展望”
http://www.dbj.jp/pdf/investigate/mo_report/0000015497_file4.pdf, 2017.
- [5] かながわ福祉サービス振興会, “介護ロボット活用ガイドライン”,
<http://www.kaigo-robot-kanafuku.jp/image/A5ACA5A4A5C9A5E9A5A4A5F3C6B3C6FECAD4.pdf>, 2017.
- [6] 新エネルギー・産業技術開発機構, “産業用ロボットの現状と課題”, ロボット白書 2014, 第 3 章.
- [7] 厚生労働省, “平成 26 年業務上疾病発生状況調査”.
- [8] CMC 出版, “実用化に向けたソフトアクチュエータの開発と応用・制御技術”, 2017, pp.1-7.
- [9] 山野美咲, 小川尚希, 橋本稔, 高崎緑, 平井利博, “収縮型 PVC ゲルアクチュエータの構造と駆動特性”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.7, 2009, pp.718-724.
- [10] M. Lima, N. Li, M. Andrade, S. Fang and J. Oh, “Electrically, chemically, and photonically powered torsional and tensile actuation of hybrid carbon nanotube yarn muscles”, Science, Vol.16, Issue 6109, 2012, pp.928-932.
- [11] P. Polygerinos, Z. Wang, K. Galloway, R. Wood and C. Walsh, “Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation”, Robotics and Automation Systems, Vol.73, 2015, pp.135-143.
- [12] S. Wakimoto, K. Suzumori and J. Takeda, “Flexible artificial muscle by bundle of McKibben fiber actuators”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2011, pp.457-462.
- [13] B. Tondu and P. Lopez, “Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators”, IEEE Control Systems, Vol.20, Issue 2, 2000, pp.15-38.

- [14]FESTO, https://www.festo.com/cat/ja_jp/products_010606, (参照日 2017 年 11 月 23 日).
- [15]T. Nakamura and H. Shinohara, “Position and force control based on mathematical models of pneumatic artificial muscles reinforced by straight glass fibers”, Proc. Of IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, 2007, pp.4361-66.
- [16]N. Saga, J. Nagase and T. Saikawa, “Pneumatic artificial muscles based on biomechanical characteristics of human muscles”, Applied Bionics and Biomechanics, Woodhead Publishing, Vol.3, No.3, 2006, pp.191-197.
- [17]細野暢彦, 堀江一之, “アゾベンゼンによる高分子ネットワークの光制御とフォトメカニカルデバイスへの応用”, 高分子, 56 巻, 7 月号, 2007, pp.493-496.
- [18]T. Mitsumata and N. Abe, “Giant and reversible magnetorheology of carrageenan/iron oxide magnetic gels”, Smart Mater. Struct., 20, 124003, 2011.
- [19]中村太郎, “図解人工筋肉-ソフトアクチュエータが拓く世界-”, 日刊工業新聞社, 2011, p119.
- [20]T. Fukushima, K. Asaka, K. Nagata, K. Sakai, T. Aida, “Fully plastic actuator through layer-by-layer casting with ionic-liquid-based bucky gel”, Angew. Chem. Int. Ed., Vol. 44, 2005, pp.2410-2413.
- [21]金藤敬一, “導電性高分子によるソフトアクチュエータの研究動向, 特性および課題”, アクチュエータの新材料, 駆動制御, 最新応用技術, 2017. pp.11-14.
- [22]S. Hara, T. Zama, S. Sewa, W. Takashima, K. Kaneto, “Highly stretchable and powerful polypyrrole linear actuators”, Chem. Lett., Vol.32, 2003, pp.576-577.
- [23]H. Okuzaki, T. Kunugi, “Adsorption-induced bending of polypyrrole films and its application to a chemomechanical rotor”, J. Polym. Sci. Polym. Phys., Vol.34, 1996, pp.1747-1749.
- [24]生嶋君弥, ジョンステファン, 小野敦, 長光左千男, “人工筋肉に向けた積層型ポリマーアクチュエータ”, Panasonic Technical Journal, Vol.56, No.3, 2010, pp.10-15.
- [25]T. Hirai, H. Sadatoh, T. Ueda, T. Kasazaki, Y. Kurita, M. Hirai, S. Hayashi, “Polyurethane-elastomer-actuator”, Die Angew. Makromol. Chem., Vol.240, 1996, pp.221-229.
- [26]R.E. Pelrine, R.D. Kornbluh, J.P. Joseph, “Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation”, Sens. Actuators A, Vol.64, 1998, pp.77-85.
- [27]W. Lehmann, L. Hartmann, F. Kremer, P. Stein, H. Finkelmann, “Direct and inverse

- electromechanical effect in ferroelectric liquid crystalline elastomers”, *J. Appl. Phys.*, Vol.86,1999, pp.1647-1652.
- [28]安積欣志, 奥崎秀典, 鈴木康一, “ソフトアクチュエータの材料・構成・応用技術”, S&T 出版株式会社, 2016, pp.279-293.
- [29]則次俊郎, “空気圧ゴム人工筋の開発と人間支援ロボットへの応用”, 日本 AEM 学会誌, Vol.14, No.2, 2006, pp.186-190.
- [30]土井俊幸, 脇元修一, 鈴木康一, 神田岳文, “細径 McKibben 型人工筋の集積化に関する研究-第 1 報: 収縮率と収縮力の静特性の測定”, ロボティクスメカトロニクス講演会, 2015,1P1-B03.
- [31]金藤敬一, “高分子アクチュエータ”, *高分子*, Vol.55, No.12(2006), pp.956-960.
- [32]奥井学, 中村太郎, “人の運動アシストから見たソフトロボティクス”, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.1, 2019, pp.34-37.
- [33]M. Okui, S. Iikawa, Y. Yamada, T. Nakamura, “Fundamental characteristic of novel actuation system with variable viscoelastic joints and MR clutches for human assistance”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, [1045389X1770521. 10.1177/1045389X17705216.], 2017.
- [34]飯川伸吾, 奥井学, 鈴木隆二, 山田泰之, 中村太郎, “可変粘弾性関節を有するアシストスーツの開発-粘弾性が人の動作に与える影響と粘弾性制御則の提案-”, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 8, 2018, pp.567-575.
- [35]S. Kimura, R. Suzuki, M. Kashima, M. Okui, R. Nishihama, T. Nakamura "Assistive method that controls joint stiffness and antagonized angle based on human joint stiffness characteristic and its application to an exoskeleton", *IEEE/RSJ The 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2019)*, Belo Horizonte, Brazil, 2019.
- [36]Y. Mano, R. Ishikawa, Y. Yamada, T. Nakamura, "Development of High-speed Type Peristaltic Crawling Robot for Long-distance and Complex-line Sewer Pipe Inspection", *Proc. of The 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2018)*, Spain, Madrid, 2018.
- [37]M. Kamata, S. Yamazaki, Y. Tanise, Y. Yamada, T. Nakamura, “Morphological change in peristaltic crawling motion of a narrow pipe inspection robot inspired by earthworm’s locomotion”, *Advanced Robotics*, DOI:10.1080/01691864.2017.1417158, 2018.
- [38]T. Yasui, Y. Mano, F. Ito, T. Nakamura, “Development of joint attachment for passing curved pipe of peristaltic motion robot for inpipe inspection”, in *Proceedings of 22nd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines(CLAWAR)*, Shah Alam, Malaysia, 2019, pp.45-

52.

- [39] K. Ashigaki, S. Yoshihama, A. Iwasaki, K. Tagami, Y. Yamada, H. Habu, T. Nakamura, “Study of an Automatic Material Input Method for the Continuous Production of Solid Propellant by a Peristaltic Mixer”, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol.16, No.7, 2018, pp.662-667.
- [40] D. Hagiwara, K. Ashigaki, K. Wakamatsu, M. Ueda, Y. Yamada, T. Nakamura, “Soil Transport experiment with a multi-unit peristaltic transport machine for compact automatic transportation of excavated soil”, 2019 IEEE/SICE International Symposium Integration(SII2019), Paris, France, 2019.
- [41] K. Glenn, Klute et al., “Fatigue Characteristics of McKibben Artificial Muscle Actuators”, Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference of Intelligent Robots and Systems Victoria, B.C., Canada October 1998.
- [42] 冬木正紀, “静電植毛により耐久性が飛躍的に向上した McKibben 型人工筋肉の開発”, ロボティクスメカトロニクス講演会 2017.
- [43] H. Tomori, Y. Sato, S. Ando, “Cyclic Failure Testing of Rubber Pneumatic Artificial Muscles for Optimizing Durability”, IECON2019, Lisbon, Portugal, LD-000833.
- [44] 藤本邦彦, “ゴムの破壊過程の研究, 一定応力繰り返し条件下での疲労破壊過程”, 日本ゴム協会誌, 第 45 巻, 第 4 号, 1972.
- [45] 深堀美英, “エラストマーの疲労寿命予測”, 破壊力学による S-N 曲線の理論解析と応用, 日本ゴム協会誌, 第 58 巻, 第 10 号, 1985.
- [46] 池田裕子, “シンクロトロン X 線による架橋天然ゴムの伸張結晶化解析”, 日本ゴム協会誌, 第 84 巻, 第 1 号. 2011.
- [47] ゴム工業便覧, 日本ゴム協会, 1994, pp. 149-151.
- [48] T. Nakamura, “Experimental comparisons between McKibben type artificial muscles and straight fibers type artificial muscles.” In Proc. SPIE International Conference Smart Structures, Devices and Systems III, 2006, pp.641424.
- [49] Y.C.ファン, “固体の力学/理論”, 培風館, 1970, p.451.
- [50] 石川覚志, “ゴムの有限要素法の学び方” 日刊工業新聞社, 2015, p.127.
- [51] 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.
- [52] 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式ゴム人工筋肉の長寿命化のための形状検討”, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016, 3J1-1.
- [53] 野崎孝志, 則次俊郎, “McKibben 型空気圧ゴム人工筋の有限要素法による動

- 作解析”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.754, 2009, pp.1755-1762.
- [54] TORAY, <http://www.torayca.com/download/pdf/torayca.pdf>, (参照日 2017 年 11 月 27 日).
- [55] C. Woo, S. Choi, S. Lee and H. Kim, “Useful Lifetime Prediction of Rubber Components Using Accelerated Testing”, IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, Vol.59, No. 1, 2010.
- [56] 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, pp. 472-479.
- [57] 登坂雅聡, “架橋ゴムの伸長結晶化”, 高分子論文集, Vol. 71, No. 11, 2014, pp. 493-500.
- [58] M. Tosaka, S. Murakami, S. Poompradub, S. Kohjiya, Y. Ikeda, S. Toki, I. Sics, B. Hsiao, “Orientation and Crystallization of Natural Rubber Network as Revealed by WAXD Using Synchrotron Radiation, Macromolecules”, Vol. 37, No. 9, 2004, pp. 3299-3309.
- [59] 生天目由紀子, 長尾圭悟, “2D-SAXS/WAXS システムを用いた結晶性高分子材料の評価”, リガクジャーナル 49, 2, 2018, pp.12-19.

研究業績

(1) 学術雑誌等

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式ゴム人工筋肉の長寿命化のためのアスペクト比の検討”, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.857 (2018)
2. 山田泰之, 小島明寛, 奥井学, 中村太郎, “軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命効率化のための形状検討”, 計測自動制御学会論文集, Vol.54, No.6, 1/7 (2018)
3. 辻知章, 小島明寛, 奥井学, 久道樹, 中村太郎, “内圧を受ける軸方向繊維強化ゴム円筒の変形特性”, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.868(2018)
4. Akihiro Kojima, Manabu Okui, Itsuki Hisamichi, Tomoaki Tsuji, Taro Nakamura, “Straight-Fiber-Type Artificial Muscle Deformation Under Pressurization”, IEEE Robotics and Automation Letter, Vol.4, No.3, JULY, (2019)
5. 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, 第 50 巻, 第 2 号, (2019)
6. 小島明寛, 奥井学, 久道樹, 伊藤文臣, 辻知章, 中村太郎, “高出力, 長寿命を目指したくびれ型人工筋肉の提案” 日本フルードパワーシステム学会論文集(投稿中).

(2) 国際会議における発表

7. A. Kojima, M. Okui, Y. Yamada, and T. Nakamura, “Shape consideration for prolonging the lifetime of the Straight-fiber-type pneumatic artificial muscle”, Proc. of the 11th International Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology(i-CREATE2017), KOBE, JAPAN, PT5-3, (2017.8)
8. A. Kojima, M. Okui, Y. Yamada, and T. Nakamura, "Prolonging the lifetime of straight-fiber-type pneumatic rubber artificial muscle by shape consideration and material development", in Proc. of the first IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), Livorno, Italy, WeTT.23, (2018.4)
9. I. Hisamichi, A. Kojima, S. Kobayashi, M. Okui, T. Nakamura, and T. Tsuji “Material Properties of Fiber-Reinforced Rubber Tube” The 6th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (ACMFMS2018), Tainan, Taiwan, S5-5, (2018.10)
10. A. Kojima, M. Okui, I. Hisamichi, N. Tadami, T. Tsuji, and T. Nakamura, “Strain-induced crystallization to prolong the lifetime of pneumatic artificial muscles” SPIE, Smart Structures Nondestructive Evaluation, Denver, Colorado, USA, 10965-30, (2019.3)
11. A. Kojima, M. Okui, I. Hisamichi, T. Tsuji, and T. Nakamura, “Straight-Fiber-Type Artificial Muscle Deformation Under Pressurization”, IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), Seoul, Korea, WeAT1.6, (2019.4)
12. S. Kuriyama, I. Hisamichi, F. Ito, A. Kojima, M. Okui, T. Kojima, T. Nakamura, T. Tsuji, “FEM Analysis of 3D Printable Pleated Pneumatic Artificial muscle” The

10th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Pattaya, Thailand, (2019.12)

13. M. Okui, F. Ito, A. Kojima, and T. Nakamura, “Noninflatable Pneumatic Artificial Muscle Requiring Low Space and Consumption Flow Rate” IEEE/SICE International Symposium on System Integration(SII)(SII2020),Honolulu, Hawaii, USA, (2020.1)
14. F. Ito, A. Kojima, M. Okui, and T. Nakamura, “Proposal for 3D-printed Pneumatic artificial muscles-Effect of leaf spring stiffness on contraction amount and contraction force-”IEEE/SICE International Symposium on System Integration(SII)(SII2020),Honolulu, Hawaii, USA, (2020.1)

(3) 国内学会・シンポジウム等における発表

15. 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式ゴム人工筋肉の長寿命化のための形状検討”, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3J1-1, (2016.12)
16. 小島明寛, 奥井学, 山田泰之, 中村太郎, “短繊維補強空気圧式ゴム人工筋肉の開発”, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2017), 1F2-02, (2017.9)
17. 山田泰之, 小島明寛, 中村太郎, “日常生活で利用可能な人工皮膚筋肉を用いたパワーアシストジャケットの提案”, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2A1-04, (2017.12)
18. 小島明寛, 奥井学, 山田泰之, 中村太郎, “Prolonging the lifetime of straight-fiber-type pneumatic rubber artificial muscle by shape consideration and material development”, 日本ロボット学会ソフトロボティクス研究専門委員会, (2018.5)
19. 小島明寛, 奥井学, 山田泰之, 中村太郎, “軸方向繊維強化型人工筋肉の応力振幅低減による長寿命化の検討”, ロボティクスメカトロニクス講演会 2018, 2A2-G15,(2018.6)
20. 小島明寛, 奥井学, 山田泰之, 中村太郎, “人工筋肉の疲労寿命について”, JSME 材料力学部門, ゴムの材料力学に関する研究会, (2018.7)
21. 小島明寛, 奥井学, 辻知章, 中村太郎, “軸方向繊維強化型人工筋肉の耐久試験による伸張結晶化の長寿命化への影響確認”, 平成 30 年秋季フルードパワーシステム講演会, pp.1-3,(2018.10)
22. 小島明寛, 伊藤文臣, 奥井学, 中村太郎 “3D プリンタを利用した印刷可能な空気圧アクチュエータの検討-Pleated Pneumatic Artificial Muscles の試作評価-”, ロボティクスメカトロニクス講演会 2019, 2A1-C07,(2019.6)

(4) 特許等

23. 中村太郎, 山田泰之, 奥井学, 小島明寛, 流体注入式アクチュエータの製造方法及び流体注入式アクチュエータ, 特願 2017-173545
24. 中村太郎, 奥井学, 小島明寛, アクチュエータの制御方法及びアクチュエータ, 特願 2018-105262
25. 中村太郎, 奥井学, 小島明寛, 動作装置用ゴム部材の製造手法, 動作装置用ゴム部材およびこれを用いた動作装置, 特願 2019-139177
26. 中村太郎, 辻知章, 奥井学, 小島明寛, 久道樹, 伊藤文臣, 栗山正太郎, ア

クチュエータ，特願 2019-221070

(5) 研究助成

27. 公益財団法人江野科学振興財団第 31 回研究助成「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」

謝辞

本研究を行うに当たりまして、多くの方々にご支援をいただきました。本論文の主査である中央大学理工学部教授中村太郎先生には、研究に関するご指導だけでなく、研究者としての扉を開いてくださいました、大変感謝しております。中央大学理工学部教授辻知章先生、中央大学理工学部教授米津明生先生、中央大学理工学部教授大下英吉先生、東京工業大学工学院教授井上裕嗣先生には学位論文の副査をしていただき、貴重なご意見をいただきました、感謝しております。法政大学デザイン工学部准教授山田泰之先生、中央大学理工学部助教奥井学先生、中央大学研究開発機構機構助教西濱里英先生、中央大学研究開発機構機構助教車谷駿一先生には日ごろから研究の相談に乗っていただき、多くのアドバイスをいただきました、感謝しております。株式会社ブリヂストン 櫻井良様、厨義典様、不二ラテックス株式会社 濱谷翼様、市村拓実様、株式会社右川ゴム製造所 右川誠治様、志村司様には人工筋肉を作製していただき、またゴムに関するアドバイスをいただきました、感謝しております。株式会社ソラリス 田上様、風間様、横山様には試験装置に関するアドバイスをいただきました、感謝しております。中央大学中村研究室の鈴木隆二さん、木村成吾さん、町田勝紀さん、園城竜斗さんには同じ研究班として色々とお世話になりました、感謝しています。また、中央大学辻研究室の久道樹さん、栗山正太郎さんには、有限要素法解析や材料試験でお世話になりました、感謝しています。中央大学中村研究室のメンバーである小網さん、武田さん、河合さん、中平さんには研究室生活を支援していただきました、感謝しています。中村研究室の学生のみなさんには毎日の生活でお世話になりました、感謝しています。

また、本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援により実施されました。感謝いたします。

最後に、進学を後押しし、応援してくれた妻、息子、娘に感謝します。

2020年3月
小島明寛