

「論文の内容の要旨」

## “伸張結晶化による空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化”

小島 明寛

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の特性と破壊メカニズムについて述べた。まず軸方向繊維強化型人工筋肉の構造、収縮特性、作製方法、アプリケーションについて述べ、次いで、破壊のメカニズムについて述べた。

第3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4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、与圧印加により人工筋肉の形状が変化し、それによる収縮力の低下が発生した。

第5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。

以上からゴムの伸張結晶化特性を利用することで、亀裂の進展を阻害し、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た。今後は実際の亀裂近傍での結晶層形成を顕微鏡、広角X線回折等で確認を行う予定である。

また、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のゴム製品にも応用できる可能性がある。

## 「論文審査の結果の要旨」

### I. 論文の主題

#### 伸張結晶化による空気圧ゴム人工筋肉の長寿命化

### II. 当該研究分野における位置づけ

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。

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・製造業・介護の分野は、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。

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、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、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ている。本人工筋肉は原理的にゴムの大変形を利用しており、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。また、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。

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、長寿命化に取り組んだ。

### III. 論文の構成（目次と各章の概要）

■第一章：緒言 近年の労働人口の減少などによるソフトアクチュエータの必要性について述べた。その中で、空気圧ゴム人工筋肉に着目し、実用化に向けた課題である疲労寿命について述べた。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。

■第二章：軸方向繊維強化型人工筋肉の特性と破壊メカニズム 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。まず軸方向繊維強化型人工筋肉の構造、収縮特性、作製方法、アプリケーションについて述べ、次いで、破壊のメカニズムについて述べた。

■第三章：L/D比を変更した際の寿命及び収縮特性への影響評価 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。次に目標値を満足する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。

■第四章：与圧印加による長寿命化 NRの伸張結晶化特性に着目した人工筋肉の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、通常に 100 倍程度の長寿命化効果を確認した。しかし、与圧印加により人工筋肉の形状が変化し、それによる収縮力の低下が発生した。

■第五章：長寿命かつ高出力を目指したくびれ型人工筋肉の提案 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、通常のと与圧印加と比較して高出力であることを確認した。

■第六章 結論： 本論文の要約を示し、今後の研究課題を記述した。

#### IV. 論文の独自性や成果

論文の独自性として以下が挙げられる。

- ・軸方向繊維強化型人工筋肉の内径: $D$  と稼働部長さ: $L$  の比を変更した際の疲労寿命を測定し、 $L/D$  比と疲労寿命に関する関係性を見出したこと。また、 $L/D$  比を変更した際の収縮特性の測定も行い、 $L/D$  比と収縮特性の関係性を見出したこと。
- ・天然ゴムの伸張結晶化特性に着目し、与圧を印加することで結晶層を維持して亀裂の伸展を抑制し、人工筋肉及びゴム材料の長寿命化を達成したこと。
- ・くびれ型人工筋肉を提案して、与圧を印加することでの収縮力の低下を解消したこと。
- ・FEM 解析により軸方向繊維強化型人工筋肉をモデル化して、変形形状及び収縮特性を算出したこと。

#### V. 論文の課題

今後は実際の亀裂近傍での結晶層形成を確認するために、顕微鏡や広角 X 線回折による観察に取り組む。

#### VI. 論文の評価

本論文は新しい手法として、天然ゴムの伸張結晶化特性を利用した軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化に取り組んだ。論文の内容は、人工筋肉の破壊メカニズムからそれを克服するための伸張結晶化特性の利用、また収縮力低下を解消する手法の提案まで行っており、その成果も十分であると考えられる。

以上より本論文は博士(工学)の学位を授与する十分な水準に達しているものと評価する。