

熱可塑性エラストマを用いた 修復可能な人工筋肉の成型方法の確立

Establishing a method for producing repairable artificial muscles

○藤田寧*, 戸森央貴**

○Nei Fujita*, Hiroki Tomori**

*山形大学,**山形大学大学院

*Yamagata University, **Yamagata University Graduate School

キーワード：人工筋肉 (artificial muscles), 熱可塑性エラストマ (thermoplastic elastomer), アラミド繊維 (aramid fiber), 軸方向繊維強化型人工筋肉 (straight fibers type artificial muscles),

連絡先：〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部機械システム工学科 戸森研究室
藤田寧, Tel.: (0238)26-3217, E-mail: tca56073@st.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

近年、人と協調するロボットとしてソフトロボットが注目されている。^{1~4)} 人と協調するロボットでは、人と接触した際の安全性やロボット周辺的环境に適応する柔軟性が重要になってくる。⁵⁾ 一方でロボットは多くのアクチュエータから構成されており、アクチュエータの性能の影響を受けやすい。⁶⁾ そのため、ロボットに用いられるアクチュエータから見直す必要があり、構造的な柔軟性を持ち、軽量であるソフトアクチュエータに注目が集まっている。⁷⁾ その中でも出力密度の高い軸方向繊維強化型人工筋肉に着目した。

本人工筋肉は空気圧ゴム人工筋肉の中で主流である McKibben 型人工筋肉と比較して5倍以上の収縮力を発揮することがわかっている。⁸⁾ これまでの研究では軸方向繊維強化型人工筋肉の長寿命化を目指し、靱性の高いアラミド繊維

を使用することにより繰り返し耐久性を向上させることに成功したが、次に径方向への大きな膨張によるゴムチューブの破損が問題となった。

そこで人工筋肉のゴムチューブの破損を防ぐため、目視できない微細な傷の修復効果の付加を目指すこととし、熱可塑性エラストマ（以下、TPE）に着目した。TPE に加熱処理を行うことで内部の応力の低下と共に寿命の向上が見られた為、人工筋肉のゴムチューブに使用することで修復機能を付加が見込めると考えた。

しかし TPE を用いたチューブの形成方法が確立していない。本稿では TPE の修復効果の確認と TPE をもちいた人工筋肉の成型方法について述べる。

2. TPE を採用する根拠の確認⁹⁾

本実験では TPE のなかでも最も需要量が多く、ほかの TPE と比べて柔らかく伸びやす

いスチレン系 TPE（以下，SEPS）を採用することとする。先行研究の実験結果をもとにした結論を示す。

まず TPE の修復効果の確認をするために、熱処理の有無による TPE シートの引張回数を比較した。試験は試験片に繰り返し一定伸長を加えてどの程度の回数で破断するかを見る定伸長疲労試験を起こした。この際の熱処理はホットプレートで行なった。実験結果は熱処理を行うことで引張回数が増加していた。実験結果より熱処理による修復効果を確認することが出来たが、ホットプレートという接触する熱処理では複雑な形状に対応不可、熱処理のムラ・変形などの問題点が挙げられた。本研究では目視できない微細な傷の修復を目指すため、人工筋肉全体をムラなくに熱する方法が必須である。

次に非接触での熱処理の方法について考えた。非接触での熱処理にはオープンやマイクロ波による熱処理がある。オープンによる熱処理では、メリットとして複雑な形状にも対応可能でき、対象物に特別な加工をする必要がないが、デメリットとして表面と内部にムラが生じる。対して、マイクロ波による熱処理ではマイクロ波を吸収するための加工が必要ではあるが、複雑な形状に対応でき、かつ内部から全体に熱処理を行うことができるためムラなくできる。これらの点を踏まえ、マイクロ波による熱処理を検討していく。

マイクロ波を吸収するための加工には TPE に炭素粒子を混ぜ込むこととした。炭素粒子を混ぜ込むことによって、マイクロ波を吸収し炭素粒子を発熱させることで熱処理を行う。しかし、炭素粒子を混ぜ込むにあたって、炭素含有量によって引張回数に変化することが予想できる。そこで、炭素含有量による TPE シートの引張回数の変化を確認することにした。異なる炭素含有量の SEPS シートで定伸長疲労試験を行った結果、含有量が多いほど柔軟性が失われ引張回数が少なくなっていることが分かった。よって、

今後の研究では炭素含有量 1% の SEPS シートで試験を行っていくこととした。

最後に SEPS シートに混ぜ込む炭素量を 1% に決定し、マイクロ波による熱処理を行い修復効果の確認を行った。マイクロ波による熱処理無しで定伸長疲労試験を破断するまで行った SEPS シートと、3000 回引張るごとにマイクロ波を照射し熱処理を行った SEPS シートを比較した。結果、マイクロ波による熱処理無しに比べて熱処理ありの SEPS シートが平均引張回数がおおよそ 2.54 倍平均引張回数が増加していた。

このことから炭素含有量 1% の SEPS シートはマイクロ波による熱処理を行うことによって寿命が延びることが分かったため、本実験で SEPS を採用することとした。

3. SEPS をもちいた人工筋肉の成型方法の確立

修復可能な人工筋肉の成型方法の確立に向けた研究の現在までの研究結果を示す。

3.1 繊維を張った型での成型

型にアラミド繊維を軸方向に張り粒状の SEPS を入れ加熱し、十分に溶けたところに芯棒を挿すアプローチ方法をとった。成型の作製手順を以下に示す。

- 1) アラミド繊維を型の中に張り巡らせ、SEPS を入れ 250℃ のジェットオープンで 60 分加熱する (Fig.1-1)
- 2) 取り出して芯棒を差し込み空冷ののち、型から取り外す (Fig.1-2)

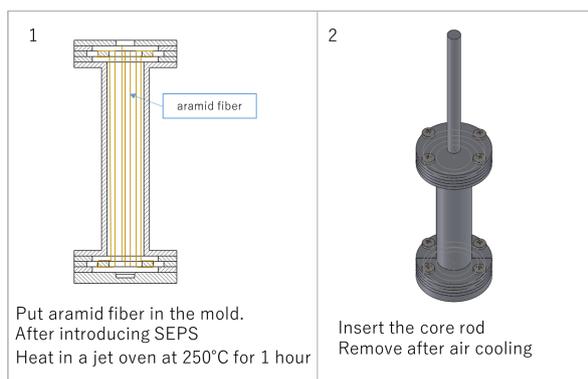


Fig. 1 繊維を張った型での成型.

Fig.2 に示した作製結果をみるとアラミド繊維が露出していることがわかる. このことから芯棒を加熱後に挿すことで, 外側へ繊維が流れ動いてしまったことがわかる. また均等な厚みの人工筋肉ができていないこともわかる.

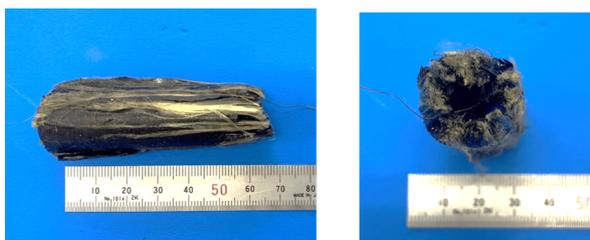


Fig. 2 繊維を張った型での成型物 (左) 側面 (右) 断面.

3.2 シートを芯棒に巻いての成型

粒状のSEPSではなくシート状にしたSEPSを芯棒に1周巻き付け, 型で筒状に成型するアプローチ方法をとった. 成型方法の制作手順を以下に示す.

- 1) 粒状 SEPS をプレス加工を行い, 0.6mm の SEPS シートを 4 枚作製する (Fig.3-1)
- 2) 金棒にアラミド繊維を巻き付け, SEPS シートを 2 枚用いて挟み込み, プレス加工し, 包含シートを作製する (Fig.3-2)
- 3) 芯棒に SEPS シート 1 周, 包含シート, SEPS シート 1 周の順に巻き付ける (Fig.3-3)

- 4) 直径 18mm の円柱状の穴の開いた型にはめて 210 °C のジェットオーブンで加熱する空冷後, 型から取り外す (Fig.3)

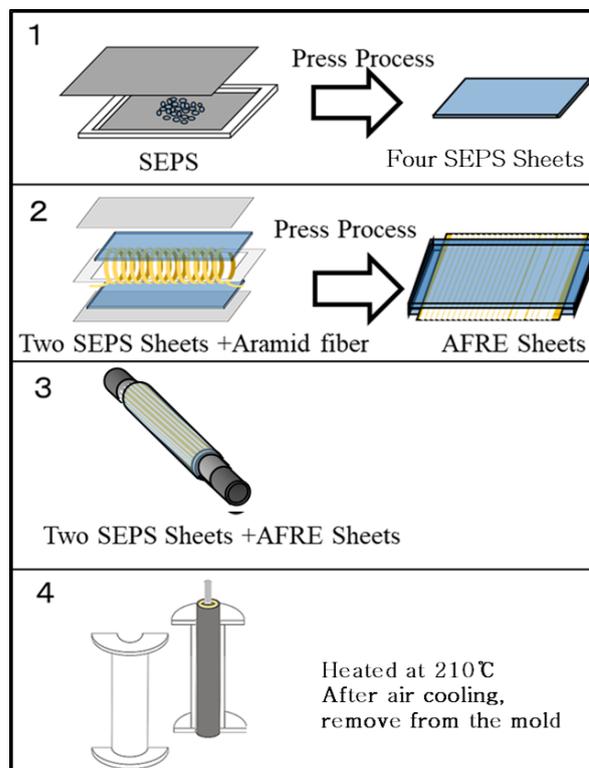


Fig. 3 シートを芯棒に巻いての成型.

Fig.4 に示した作製結果を見ると 1 周巻いたシートが繋がっていないことがわかる. このことからシート 1 枚が厚く 1 周しか巻いていないことで空隙が大きいことが問題点として挙げられる.



Fig. 4 シートを芯棒に巻いての成型物 (左) 側面 (右) 断面.

3.3 薄いシートを用いた成型

前節では SEPS シートを 1 周にしたことによって空隙が生まれていたもので, 本節では SEPS

シートを薄くし芯棒に2周巻き付け、つなぎ目の空隙を少なく成型するアプローチ方法をとった。成型方法を以下に示す。

- 1) 粒状SEPSをプレス加工を行い、SEPSシートを0.6mmを2枚、0.3mmを2枚作製する (Fig.5-1)
- 2) 金棒にアラミド繊維を巻き付け、0.6mmのSEPSシートを2枚用いて挟み込み、プレス加工し、包含シートを作製する (Fig.5-2)
- 3) 芯棒に0.3mmのSEPSシート2周、包含シート、0.3mmのSEPSシート2周の順に巻き付ける (Fig.5-3)
- 4) 直径18mmの円柱状の穴の開いた型にはめて210℃のジェットオーブンで30分加熱する
空冷後、型から取り外す (Fig.5-4)

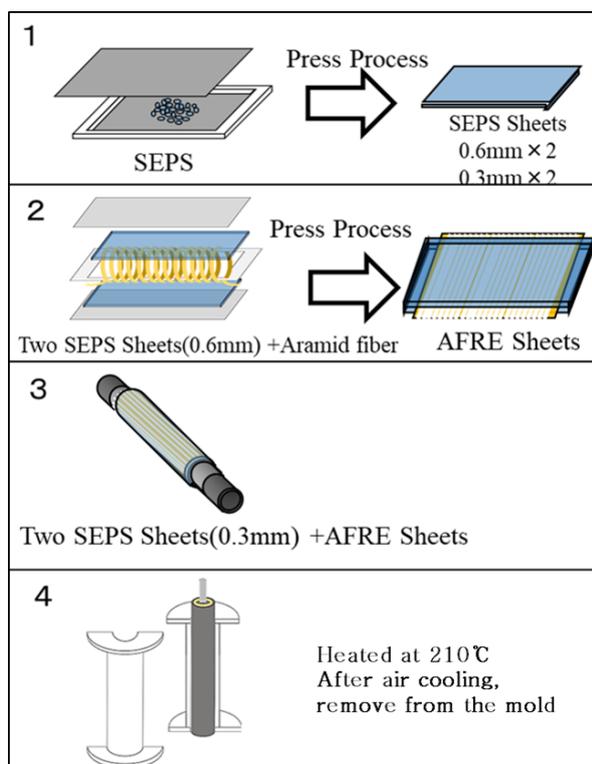


Fig. 5 薄いシートを用いた成型.

Fig.6に示した作製結果を見ると表面のクレーターも断面の隙間もなく表面上の問題はない。



Fig. 6 薄いシートを用いた成型物 (左) 側面 (右) 断面.

3.4 改良した繊維包含シートを用いた成型

3.4.1 繊維包含シートの改良

薄いシートを用いた成型を行った人工筋肉を実際に加圧して動かしてみたところ、Fig.7のように数十回で破壊してしまった。破壊した部分を観察すると破裂時に繊維が表面に飛び出していることがわかる。このことから繊維にSEPSが浸透しておらず空隙が多いことが分かった。本研究では目視できない微細な傷の修復を目指しているため、破壊時に大きな穴が出来る人工筋肉は問題がある。そこで繊維と繊維の間にもSEPSが浸透したシートの制作を試みた。



Fig. 7 破裂した箇所.

これまでは加圧をしながら210℃で繊維包含シートを作製していたが、加圧せず300℃での作製を試みた。比較すると300℃で作製した包含シートは十分に繊維にSEPSが浸透していることがわかる。表面に穴やクレーターが出来ているが、人工筋肉成型時の加熱でふさがると考え、300℃で作製した包含シートを今後採用することとした。

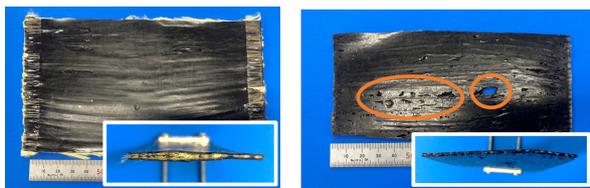


Fig. 8 繊維包含シート比較 (左) 210℃加圧あり (右) 300℃加圧なし.

3.4.2 改良した繊維包含シートを用いた成型

300℃で作製した繊維包含シートに変え3.4と同様の方法で作製した。Fig.10に示した作製結果を見ると、表面にはクレーターがあり断面には空洞が出来ていることがわかる。これは加熱が足りなかったために包含シートのクレーターや穴が残ってしまった考えた。



Fig. 9 改良した繊維包含シートを用いた成型物 (左) 側面 (右) 断面.

3.5 加熱温度を変更した成型

電気炉での加熱温度を300℃に変更し加熱時間も30分に変更し作製した。Fig.11に示した制作結果を見ると、表面が加熱により流動性が上がったために繊維が押し出されていた。さらに人工筋肉を切り開いてみると内側にクレーターが出来ていた。300℃の加熱により十分な流動性があったにもかかわらずクレーターが内側にあるということは、クレーターが出来る理由に300℃の温度に原因がある可能性がある。



Fig. 10 加熱温度を変更した成型物 (左) 側面 (右) 内面.

4. 現在での課題

現在の修復可能な人工筋肉の成型方法の課題は、SEPSの浸透した繊維包含シートの制作方法である。300℃で作製するとクレーターや穴ができてしまう一つの推測として、300℃の高温でSEPSを熱するとSEPSの添加物が熱により気化し、シートの表面に気泡が出来るのではないかと考えた。現在、熱重量分析(TGA)でSEPSの温度及び時間での変化を調査している。

5. 結言

本稿では熱可塑性エラストマは加熱することで修復効果が見込まれる材料であること、熱可塑性エラストマを用いた繊維強化型人工筋肉の成型方法を確立させるための課題を述べた。今後は、SEPSがアラミド繊維に浸透表面にクレーター・穴のないアラミド繊維包含シートの作製方法を検討していく。

参考文献

- 1) 飛田和輝, 嵯峨山功幸: 視覚障がい者向けガイダンスロボットの実証実験. 第33巻, 第8, 596-599, 日本ロボット学会誌 (2015)
- 2) 伊原正: 医療用ロボットとアクチュエータ, 第9, 677-679, 日本ロボット学会誌 (2015)
- 3) 橋本周司: 人間と共生するロボの実現に向けて, 第57巻, 第1, 29-31, 映像情報メディア学会 (2003)
- 4) 塩見唱裕: 「人ロボット共生学」特集について, 第29巻, 第10, 1, 日本ロボット学会誌 (2011)

- 5) 櫻井良：ソフトロボット学への産業界からの期待，第122巻，第1205，10-11，特集ソフトロボット学（2019）
- 6) 川村貞夫：今後の製造業ロボット研究に期待．第33巻，第5，298-299，日本ロボット学会誌（2015）
- 7) 南之園彩人，重宗宏毅，細谷直基，前田真吾：柔らかく変形可能なモータ，第58巻，第19，798-801，計測と制御（2019）
- 8) 山田泰之，小島明寛，奥井学，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効率化のための形状検討，第54巻，第6，557-563，計測自動制御学会論文集（2018）
- 9) HirokiTomori,TakumaSasama,ShingoAndo:Recovery from fatigue of pneumatic artificial muscle using a thermoplastic elastomer,Advanced Robotics(2020)