

# 論文要旨

## 巻フィルムチューブ式形状記憶合金人工筋肉アクチュエータの開発

Development of Shape Memory Alloy Artificial Muscle Actuator Protected by Rolled Film Tube

精密工学専攻 石川敏也

Department of Precision Mechanics, Toshiya Ishikawa

### 1. 研究目的

近年、必要が高まりつつある人間と同じ生活空間で共存できるロボットには、人間に近い形態と柔軟性が要求される。その一例である筋電義手は、靴ひもを結べる程度に機能が高度化・精細化している<sup>(1)</sup>。しかし、力がまだ小さくロボットとして自由度と柔軟性に乏しい問題があった。これは電動モータに柔軟性がなく重量当たりのトルクが小さく、限られた義手の内部に収められるモータの数量に制限があるためである。一方、人体腕内部には種々の形状の筋肉が複数密集配置され精細かつ力強い動作を発揮する。生体筋は最小単位の筋肉細胞が複数結束した構造をもち、筋肉細胞の組合せにより種々の形状の筋肉が形成されている。従って、生体筋細胞と同様の「柔軟性の高い伸縮型リニアアクチュエータ」を実現すれば全身の筋肉をモデルとする人工筋肉の製作が可能となり、精細かつ力強い人間親和型ロボットが実現できると考える。その人工筋肉アクチュエータとして形状記憶合金 (SMA) は、発生力が大きく直接通電で駆動できることからアクチュエータとして多くの研究機関で研究され続けている。しかし、加熱冷却で制御するため応答性に問題があった。このため、SMA アクチュエータは現状では熱容量の小さい細いワイヤを単独で使用するマイクロマシンを初めとする出力の小さな小型の機器の駆動装置以外には余り使われていない。SMA で人体サイズに適合する大きな発生力を得るには太い SMA ワイヤが必要だが、熱容量が大きくなるため加熱・冷却時間が長く消費電力も大きくなる問題があった。そこで、これらの問題を解決するため、熱容量が小さく短時間で加熱・冷却できる細い SMA ワイヤを束ね合わせる方式が考えられる。しかし細い SMA ワイヤを束ね合わせると電氣的短絡や絡み合い等の問題が生じ、空気や水などの冷却媒体が圧損によりワイヤの束の中心まで届かないため、冷却が不均一になりワイヤの周囲に熱が溜まって応答性がさらに悪化する問題があった。このため、ワイヤの間隔をある程度以上空ける必要があり、実用上、装置体積の割に大きな力が得られない問題があった。このような背景のもと、SMA アクチュエータについては、マイクロマシン等の小型システム向けの開発が中心となり、人体サイズのシステムへの応用研究は、十分には進められていない現状があった。本研究の目的は、この SMA の問題を解決し、柔軟性の高い伸縮型リニアアクチュエータの人工筋肉を実現することにある。

### 2. 研究内容

本研究では、SMA の問題点を解決する手段として、熱容量が小さい細い SMA ワイヤを耐熱性と柔軟性が高い樹脂チューブに挿入し、複数本束ね合わせて発生力を高め、SMA ワイヤ同士の短絡や絡まりを防ぐと同時に、各樹脂チューブ内に冷却液を流して均一に冷却する方式を考案した。しかし、SMA ワイヤに生じる 300°C の高温に対する耐熱性と SMA ワイヤの伸縮を妨害しない柔軟性を併せ持つ樹脂チューブは存在しなかった<sup>(2)</sup>。

そこで 500°C の高熱に耐えるポリイミドフィルムを Fig.1 のような形状にカットし、Fig.2 の様に巻いて熱処理を施して成形した機械要素を考案した。これをカットパターンの形状から「 $\xi$  型巻フィルムチューブ」と呼ぶ。次に Fig.3 の様に巻フィルムチューブに細い SMA ワイヤを円筒状に巻いたコイルばねを挿入しコイルの両端に電線とアラミド糸を取付ける。これを本研究における人工筋肉の最小単位「単セル」と呼ぶ。巻フィルムチューブとアラミド糸は両端部で接続されている。SMA ワイヤは発生変位が約 5% と小さいのでコイル化で約 50% に拡大して用いる。SMA コイルばねは単セル内に冷却液を流して冷却する。

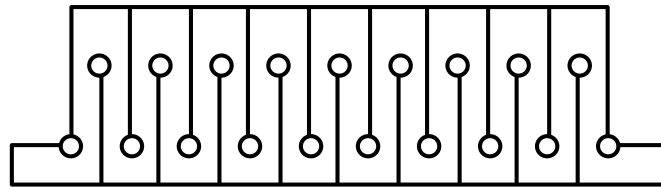


Fig.1  $\xi$  type cut pattern (material: Polyimide)

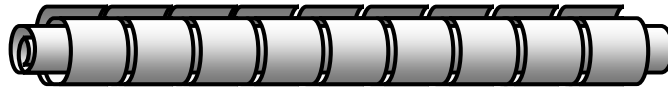


Fig.2  $\xi$  type rolled film tube

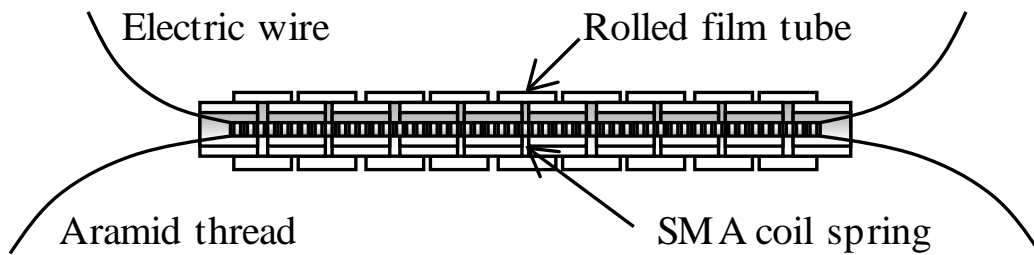


Fig.3 Unit cell

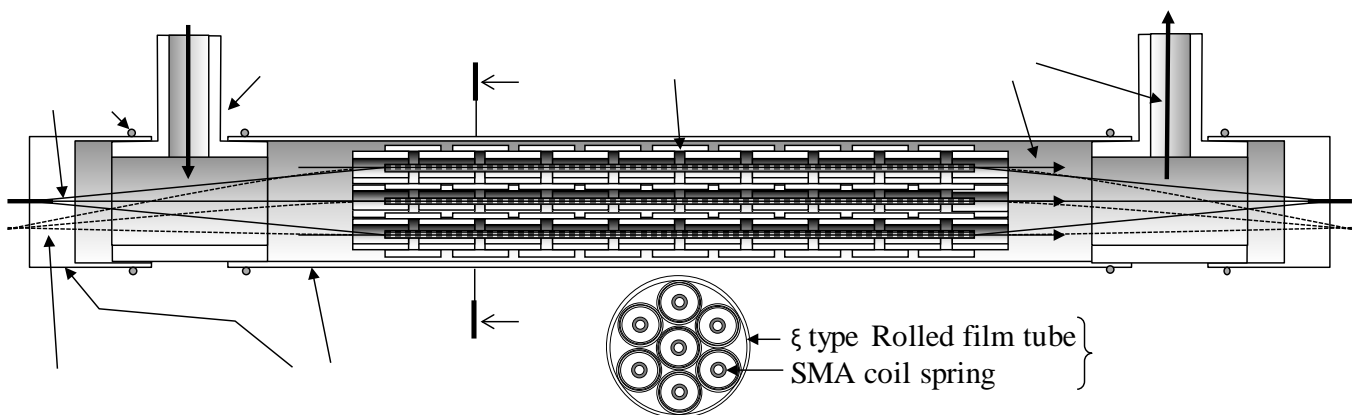
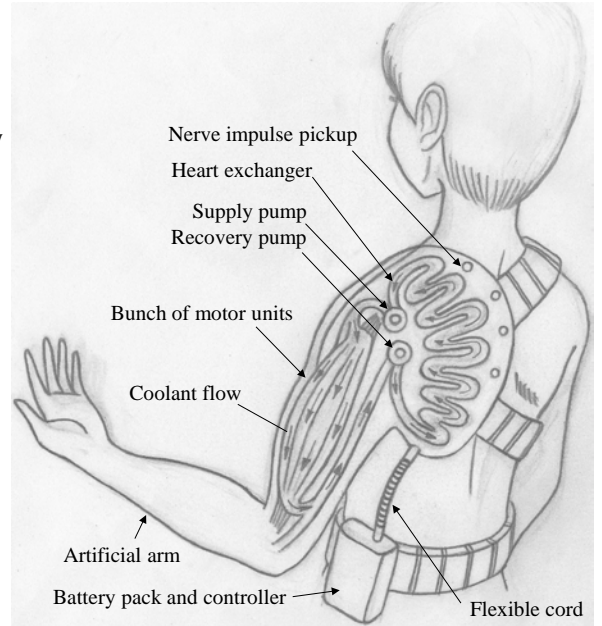
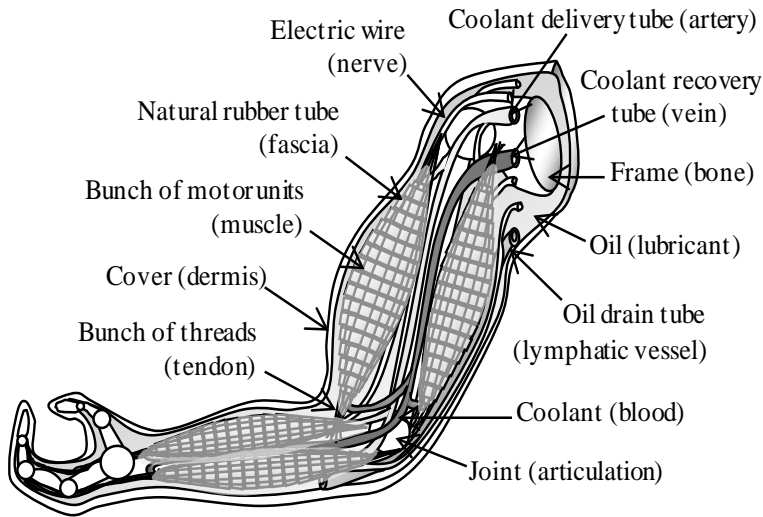


Fig.4 Motor unit

次に Fig.4 のように単セルとアラミド糸と電線を各々束ね合わせ SMA を電気的に並列に結線し弾性変形限界が 1000%にも及ぶ大きな柔軟性と十分な液シーリング力を持つ天然ゴムチューブに単セルを 7 本束ね合わせたものを挿入し、両端に配管用チューブ継手を取り付けてコンポーネント化（ユニット化）を図った。天然ゴムチューブ内に冷却液を流すことで各単セル内の SMA コイルばねを均一に冷却することができる。解剖学的には、一本の運動神経に支配される筋肉細胞の束を運動単位（Motor unit）と呼ぶ。このアナロジーから本ユニットを「モータユニット」と呼ぶ<sup>(3)</sup>。

本アクチュエータは、生体筋と形態が似ており義手やロボット等へ適用する場合、Fig.5(a)(b)のように生体筋と同様の形態で適用されるものとする。そこで、人体に装着する場合や接触する場合において人体との適合性を考慮して冷却液温度を 36°C一定に維持した上で、発生力・発生変位・応答周波数等の基礎特性について実験を行い生体筋と比較した。次に、生体筋は通常 2 本 1 組の拮抗配置にて駆動され、それ自身にばね剛性の調整機能がある。本アクチュエータは、コンポーネント化にて天然ゴムチューブの筋膜を獲得し複数本隣接配置可能なので、モータユニットを生体筋により近い拮抗配置にして剛性制御実験を行い、その特性を検証した。

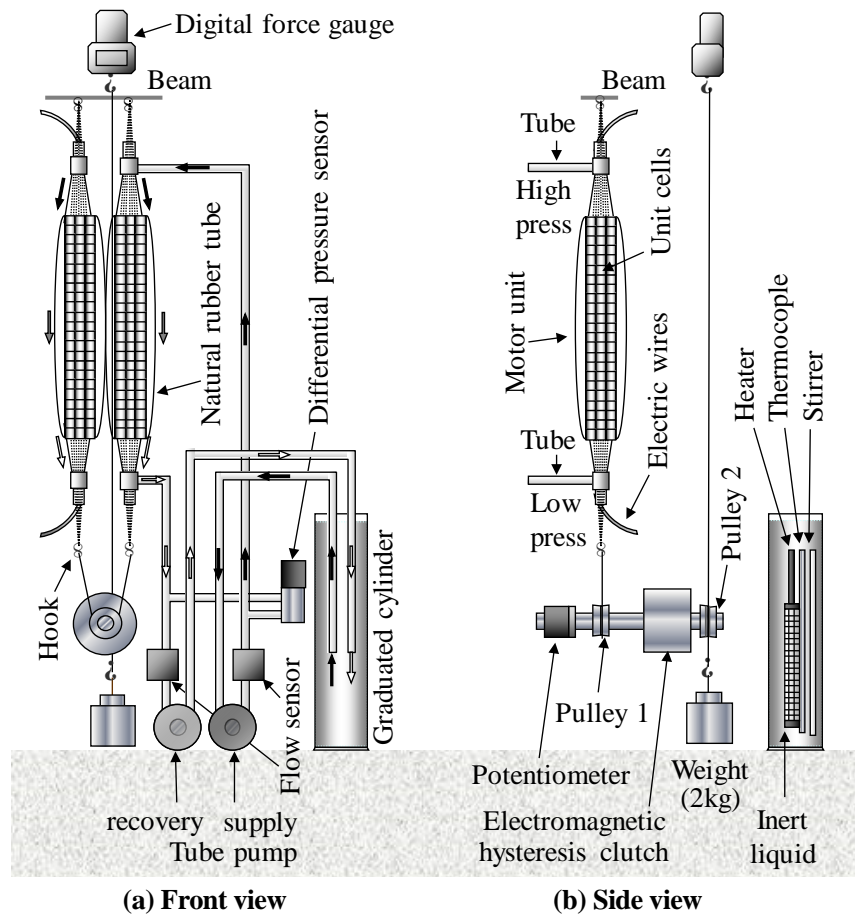


(a) Inner view of artificial muscle arm using motor units (b) View of artificial muscle arm attached with human

Fig.5 Artificial arm

### 3. 研究成果

Fig.6 に拮抗型実験装置の (a) 正面図と (b) 側面図を示す. 冷却液はポンプでモータユニット上部から下部に向け流され液温はヒータと熱電対と攪拌機で構成された温度調節器により人体と同じ 36°C に保たれている. 変位量は, ポテンシオメータの回転角で検出する. 左右のモータユニットの発生トルクはステリシスクラッチとデジタルフォースゲージにより構成されたトルクメータで測定する.



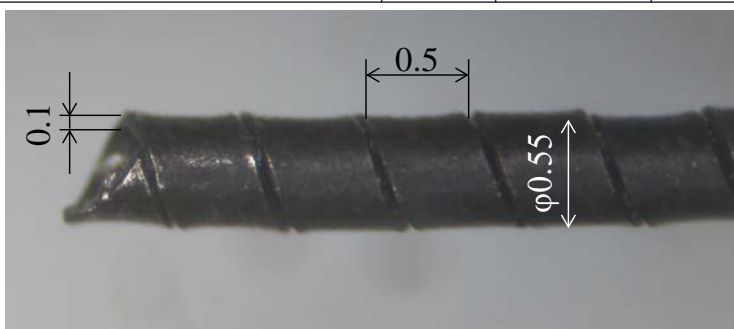
(a) Front view (b) Side view

Fig.6 Antagonistic experimental apparatus

実験の結果、生体筋と同様のパルス周波数変調（PFM）でパルス周波数にほぼ比例する発生力と発生変位が得られた<sup>(4)</sup>。また拮抗剛性制御実験によりばね剛性調整機能をもつ生体筋と同様の剛性制御が可能であることがわかった。しかし、モータユニットは天然ゴムチューブを引伸ばすことに発生力の一部が取られるため発生変位が生体筋や単セルの40%より小さい26%になった。そこで弾性エネルギーを多く蓄積でき天然ゴムチューブを引き伸ばしても発生力に十分な余裕が期待でき、表面積も大きくできる SMA 長方形断面素線コイルばねを試作し実験した<sup>(5)</sup>。その結果を Table 1 に示す。Fig.7 に試作した SMA 長方形断面素線コイルばねの写真を示す。

**Table 1 Specifications of unit cells and same size natural muscle**

Term	Natural muscle	Unit cell	
		Circular cross section	Rectangular cross section
Regular diameter [mm]	1.0		
Minimum length [mm]	100		
Minimum volume [mm <sup>3</sup> ]	78.5		
Blood temperature [°C]	36		
Weight [g]	0.08	0.14	0.12
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1019	1783	1529
Maximum output force [N]	0.31	2.82	5.16
Maximum output displacement [%]	40.0	48.4	43.6
Maximum output pressure [MPa]	0.4	3.59	6.57
Maximum output force / weight	395	2054	4385
Maximum output pressure / density [kPa*m <sup>3</sup> /kg]	0.39	2.01	4.30
Minimum time constant [ms]	100/200	600	200



**Fig.7 Coil spring made of SMA wire with rectangular cross section (photomicrograph: 55 times)**

## 6. 結論

巻フィルムチューブ方式を提案し、SMA アクチュエータの応答性問題を解決し剛性制御の可能性を明らかにし等身大の人間親和型ロボットの実現に近づけた。SMA 長方形断面素線コイルばねを試作し、特性を明らかにし生体筋の17倍の発生力5.2Nと生体筋と同等の発生変位44%と遅筋並みの時定数200msを記録した。ただし、パワー変換効率は9~14%であり、まだ改善点が残されていることがわかった。

## 参考文献

- (1) J. Fishman: "High-tech artificial arm connected the brain," National Geographic Japan Version January, Nikkei National Geographic Inc., pp. 94-113, 2010.
- (2) プラスチックフィルム研究会：プラスチックフィルム 加工と応用，技報堂出版株式会社，pp. 300-305, 1986.
- (3) 山本啓一，丸山工作：筋肉，（株）化学同人，pp. 11-20, 1986.
- (4) 菅谷光雄，中村征寿：パルス回路，オーム社，pp. 18-24, 1990.
- (5) 日本ばね学会編：ばね 第4版，丸善株式会社，pp. 181-184, 2008.