

中央大学博士論文

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

石川 敏也

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
精密工学専攻

平成28年度
2017年3月

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 人工筋肉に関する他研究について.....	2
1.3 研究目的.....	4
1.4 本論文の構成.....	4
参考文献.....	5
第2章 形状記憶合金アクチュエータ.....	7
2.1 本章の概要.....	7
2.2 形状記憶合金(SMA)について.....	7
2.2.1 物性と形状記憶効果発現機構.....	7
2.2.2 種類と形状.....	8
2.2.3 応用分野.....	9
2.3 SMA アクチュエータ.....	9
2.3.1 従来研究の紹介.....	9
2.3.1.1 直線ワイヤタイプ.....	10
2.3.1.2 マイクロマシン.....	11
2.3.2 応答性改善への取組み.....	12
2.3.2.1 強制空冷方式.....	12
2.3.2.2 強制油冷方式.....	13
2.3.2.3 ペルチエ効果方式.....	14
2.3.2.4 各強制冷却方式の比較.....	15
2.4 本章のまとめ.....	15
参考文献.....	16
第3章 巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータ.....	18
3.1 本章の概要.....	18
3.2 SMA コイルばねチューブ挿入方式の提案.....	18
3.3 本体構造.....	19
3.3.1 巻フィルムチューブ.....	19

3.3.1.1	軸方向コンプライアンス.....	21
3.3.1.1.1	巻フィルムチューブのばね特性の計算式.....	24
3.3.1.2	曲げ方向コンプライアンス.....	26
3.3.1.2.1	巻フィルムチューブの最大曲げ半径の計算式.....	27
3.3.2	単セルの構成.....	28
3.3.3	モータユニットの構成.....	29
3.4	駆動システム.....	30
3.4.1	基本構成.....	30
3.4.2	モバイル性の比較.....	31
3.4.3	モータユニットの応用例.....	33
3.4.3.1	人工筋肉義手.....	33
3.4.3.2	単セルを細くする理由.....	34
3.5	本章のまとめ.....	35
	参考文献.....	35

第4章 基礎特性と制御.....37

4.1	本章の概要.....	37
4.2	基礎特性.....	38
4.2.1	実験装置と方法.....	38
4.2.1.1	単体特性実験装置.....	38
4.2.1.2	拮抗実験装置.....	41
4.2.1.3	パルス周波数変調駆動.....	44
4.2.2	ステップ応答特性.....	45
4.2.2.1	発生力と発生変位の静特性.....	45
4.2.2.2	パルス周波数とステップ応答.....	47
4.2.2.3	パルス幅とステップ応答特性.....	48
4.2.2.4	パルス周波数と時定数.....	50
4.2.2.5	パルス周波数とパワー変換効率.....	51
4.2.3	周波数応答特性.....	53
4.2.4	生体筋との比較.....	54
4.3	拮抗剛性制御.....	55
4.3.1	差動式拮抗モデル.....	55
4.3.1.1	数式モデル.....	55
4.3.1.2	実験結果と考察.....	59

4.4	本章のまとめ.....	61
	参考文献.....	62
第5章	SMA 長方形断面素線コイルばね.....	64
5.1	本章の概要.....	64
5.2	関連する他研究について.....	65
5.3	従来型 SMA コイルばねの問題点.....	65
5.4	SMA 長方形断面素線コイルばね.....	66
5.4.1	長方形断面素線コイルばねの特長.....	67
5.4.2	試作品とその仕様.....	68
5.5	基礎特性.....	71
5.5.1	ばね特性.....	71
5.5.1.1	実験装置と方法.....	72
5.5.1.2	理論値計算式.....	73
5.5.1.2.1	ばね定数.....	73
5.5.1.2.2	ガンマ係数.....	74
5.5.1.2.3	ベータ係数.....	75
5.5.1.2.4	横弾性係数.....	76
5.5.1.2.5	最大せん断ひずみと寿命.....	76
5.5.1.3	実験結果と考察.....	77
5.5.2	ステップ応答特性.....	78
5.5.2.1	実験装置と方法.....	78
5.5.2.2	実験結果と考察.....	79
5.5.2.2.1	上りと下りのステップ応答.....	79
5.5.2.2.2	冷却液温度流量と時定数の関係.....	82
5.5.3	生体筋と従来型コイルばねとの比較.....	83
5.4	本章のまとめ.....	84
	参考文献.....	85
第6章	結論と今後の展開.....	87
6.1	結論.....	87
6.2	今後の展開.....	90
6.2.1	保温効果省エネルギー駆動.....	90
6.2.2	モータユニットの量産化.....	92
6.2.3	柔軟性の高いロボットハンド.....	92

参考文献.....	92
謝辭.....	94
研究業績.....	97

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、少子高齢化による労働力の不足より人間親和性の高いロボットの要求が高まりつつある。このようなロボットには、人間と同じ生活空間で共存できるよう人間に近い形態と柔軟性が要求され^{(1)~(3)},人間と同様の内骨格構造の導入も試みられている⁽⁴⁾。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⁽⁵⁾。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。

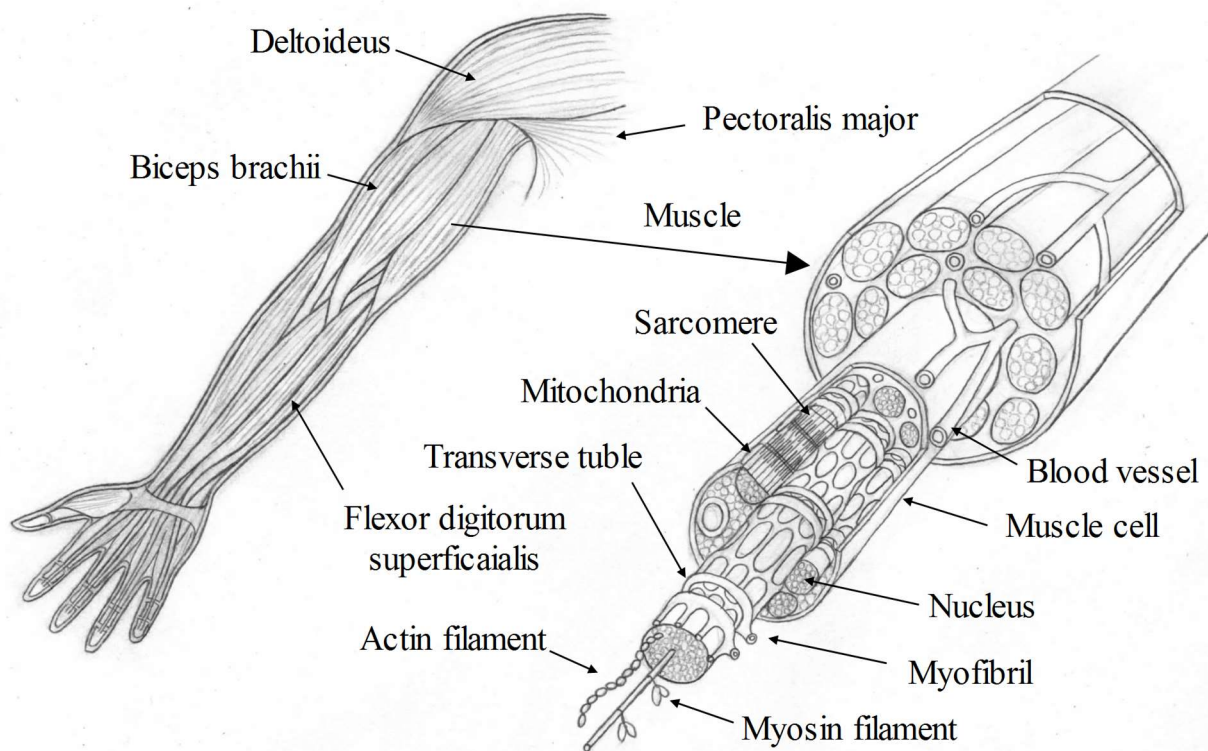


Fig.1.1 Structure of human muscle ^{(6), (7)}

一方、人体腕内部には Fig.1.1 の様に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^{(6),(7)}。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 Fig.1.2 の様に種々の形状の筋肉が形成されている⁽⁸⁾。従って、生体筋細胞と同様の高い柔軟性をもつ伸縮型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⁽⁹⁾。

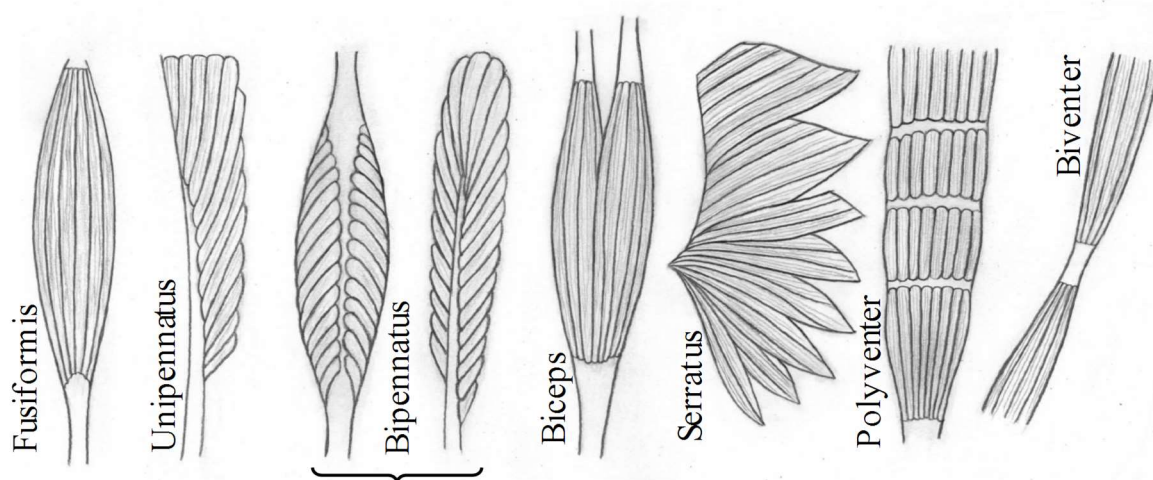


Fig.1.2 Samples of human muscle ⁽⁸⁾

1.2 人工筋肉に関する他研究について

人工筋肉の研究は、多くの研究機関で行われている。従来このアクチュエータには、マッキベンタイプを代表とする空気圧ゴム人工筋肉と化学エネルギーを機械エネルギーに変換するメカノケミカル人工筋肉の2方式が主に研究されている。どちらも1930年頃提案され、現代に至るまで研究は続けられている⁽¹⁰⁾。人工筋肉には、はっきりとした定義は存在しないが、生体筋をモデルに「柔軟性の高い伸縮型のリニアアクチュエータ」という共通のイメージは存在する。このイメージを元に、従来金属により占められてきたアクチュエータの筐体にゴムや高分子電解質などの柔軟性のある素材を用いて人工筋肉の実現を目指す研究が続けられてきた。

空気圧式ゴム人工筋肉は、自重に対する発生力が大きく空気圧の印加と排出によって比較的容易に操作できることから現在人工筋肉の主流になっている。このタイプには、ゴムチューブの軸方向の伸びを繊維メッシュで拘束して収縮力を取り出すマッキベン型と、直線状の炭素繊維で拘束して収縮力を増強した軸方向繊維強化型がある。しかし、どちらも応答性が悪く空気圧コンプレッサや電磁弁が必要で持ち運びに不便な空気圧アクチュエータ共通の問題がある⁽¹¹⁾。

メカノケミカル人工筋肉は、化学反応や吸着や膨潤などによって駆動されるアクチュエータだが、反応液の供給と反応後の液回収の循環装置が必要になるうえ応答性が悪い問題がある。また高分子電解質に電圧を印可し酸やアルカリを発生させ化学反応で伸縮させるものや、水分子を吸着脱水して発生力を取り出すものもあるが、現状では実用的応答速度は得られていない⁽¹²⁾。

近年では、以上 2 つの主流以外に静電気や金属の相変態を使う新しいタイプの人工筋肉が登場している。

静電気を使うタイプには、積層型静電人工筋肉と電歪ゴム人工筋肉がある。積層型静電人工筋肉は、2 枚の絶縁フィルム上に複数に並べ対抗させた電極間に印加する電圧をステップモータと同じように次々に移動させ駆動するものである。フィルムを用いるため軽く応答速度が極めて高いが、アクチュエータ筐体には柔軟性がなく発生力が小さい問題がある⁽¹³⁾。電歪ゴム人工筋肉は、エラストマー膜の両面に柔軟性のある電極を付け、両極に高電圧をかけることで静電吸引力によりエラストマーを圧縮し歪ませて側面方向に発生する伸びを利用するものである。ただし、伸長方向以外に力を発生できず、収縮力を得るためには予め伸長させておく必要があり硬いリンク機構が必要になる問題がある。静電人工筋肉の発生力は、正・負電極間に蓄えられる静電エネルギーを変位方向に微分して得られ、電磁式のように重いコイルを必要としない長所がある。しかし、高電圧を必要とするため安全面から実用化されたことはない⁽¹⁴⁾。

金属の相変態を利用するタイプは、一般に形状記憶合金（Shape Memory Alloy, 以後 SMA）アクチュエータとして知られている。SMA アクチュエータは、低温で与えられた負荷歪が高温で相変態により解消される時の発生力を利用するものである。小型軽量で大きな発生力（直線ワイヤ状で 300MPa）を直接通電加熱により相変態を発現することで駆動でき、高い柔軟性を併せ持つ特徴があるが、冷却は自然放冷等による間接冷却になり応答性に問題があった⁽¹⁵⁾。

1.3 研究目的

本研究は、SMA コイルばねを動力源に用いることで生体筋と同様の高い性能と柔軟性をもつ伸縮型リニアアクチュエータの実現を目指す。この実現のため、SMA アクチュエータの諸問題を解決する手法として巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータを提案し、試作実験を行いその基礎特性について検証し、応用技術について検討した。

1.4 本論文の構成

次に、本論文の構成について述べる。本論文は全 6 章で構成される。第 2 章では SMA の基本原理と SMA アクチュエータについて説明し、その応用例と問題点について説明する。第 3 章では、SMA アクチュエータの問題点の解決策として巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータを提案し、その構造と駆動システムについて説明する。第 4 章では、その基礎特性について実験しその結果について生体筋と比較し考察し、生体と同様の拮抗剛性制御について数学モデルを立て解析し同時に実験を行い検証する。第 5 章では、発生力・スペース効率・応答性の面で有利な SMA 長方形断面素線コイルばねについて試作し実験しその性能について評価する。最後に第 6 章で結論を述べ、今後の展開について説明する。

参考文献

- (1) 高岡真幸, 鈴木康一, 脇元修一, 飯嶋一雄, 徳宮孝弘: 生体模倣ロボット機構実現に向けた多繊維構造マッキベン人工筋, 第 14 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), pp. 1767-1770, 2013.
- (2) 熊本水頼: ヒューマノイド工学 生物進化から学ぶ 2 関節筋ロボット機構, 東京電機大学出版局, pp. 60-102, 2006.
- (3) 本田幸夫: 人類なら知っておきたい、「人工知能」の今と未来の話, 株式会社 PHP 研究所, pp. 70-71, 2016.
- (4) 中島慎介, 浅野悠紀, 白井拓磨, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸: 等身大筋骨格ヒューマノイド臆志郎における筋長重心ヤコビアンに基づくバランス動作, 第 14 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), pp. 1501-1504, 2013.
- (5) J. Fishman: “High-tech artificial arm connected the brain,” National Geographic Japan Version January, Nikkei National Geographic Inc., pp. 94-113, 2010.
- (6) 金子丑之助: 日本人体解剖学 第一巻 骨学 靭帯学 筋学, 南山堂, pp. 412-413, 1951.
- (7) 小堀篤信, 鈴木一朗, 野村良裕, 茅根裕己, R&M BOSPHERUS (CG イラストレーション), 高岡邦夫 (順天堂大学): 男と女の「脂肪」と「筋肉」大百科, ターザン No. 212, pp. 22-23, 1995.
- (8) 金子丑之助: 日本人体解剖学 第一巻 骨学 靭帯学 筋学, 南山堂, pp. 327-331, 1951.
- (9) 石川敏也: 紡錘状人工筋肉アクチュエータの研究, 第 5 回日本ロボット学会 学術講演会, pp. 659-660, 1987.
- (10) 高森年: アクチュエータ革命, 工業調査会, pp. 131-134, 1987.

- (11) 熊本水頼：ヒューマノイド工学 生物進化から学ぶ2 関節筋ロボット機構，東京電機大学出版局，pp. 30-32, 2006.
- (12) 柴垣南，橋本稔：収縮型PVCゲルアクチュエータの位置制御，第11回計測自動制御学会（SICE）システムインテグレーション部門講演会論文集，仙台，pp. 773-774, 2010.
- (13) 西嶋隆，山本晃生，樋口俊郎，稲葉昭夫：静電フィルムアクチュエータを用いた2自由度ロボットアームの開発，精密工学会誌，Vol.71, No.12, pp. 1574-1578, 2005.
- (14) R. Pelrine: Electrostriction of Polymer Dielectrics with Compliant Electrodes as a Means of Action. *Sensor and Actuators Physical*, Vol. 64, pp.77-85, 1998.
- (15) 本間大，中澤文雄：機能異形状記憶合金の開発と応用，精密工学会誌，Vol. 75, No.6, pp.690-694, 2006.

第 2 章 形状記憶合金アクチュエータ

2.1 本章の概要

本研究では、形状記憶合金 (Shape Memory Alloy, SMA) をアクチュエータとして使う。本章では、SMA に関する基本事項として形状記憶効果による収縮力発現機構とその応用分野について紹介する。次に、従来の SMA アクチュエータを紹介し、それらの問題点である応答性の改善について説明する。

2.2 形状記憶合金 (SMA) について

2.2.1 物性と形状記憶効果発現機構

水が温度により氷 (固相)・水 (液相)・蒸気 (気相) の 3 相に変態するように、SMA は固相の状態で低温時にはマルテンサイト相に、高温時には母相 (オーステナイト相) に変態する。これはマルテンサイト変態と呼ばれ、低温時においてマルテンサイト相において加えられた歪は、高温時の母相において開放され大きな力を発揮する。マルテンサイト変態は、変位型相変態の一種で固体中の原子が周囲の原子との結合を切らずに少しずつ移動して構造を変えるものである。この構造変化は、低温でも発現し極短時間のうちに起こる。

Fig.2.1 は、二次元の結晶格子を表しマルテンサイト変態の原子の動きを表している。左上(a)母相において正方格子の結晶を冷却すると原子が連携移動してせん断変形し、左下(b)マルテンサイト相のように平行四辺形の格子に変化する。この結晶の構造変化は、せん断変形的であり変態前後での体積変化が小さく、右下(c)のように負荷印加により歪を与えても、除荷後加熱すると再び元の(a)の構造に戻るため可逆性が良いことが特徴である。

冷却して全体がマルテンサイトになる温度を「 M_f 点：マルテンサイト変態終了温度」，加熱して全体が母相になる温度を「 A_f 点：逆変態終了温度」という。Aは，母相がオーステナイト（Austenite）と呼ばれることに由来する^{(1),(2)}。

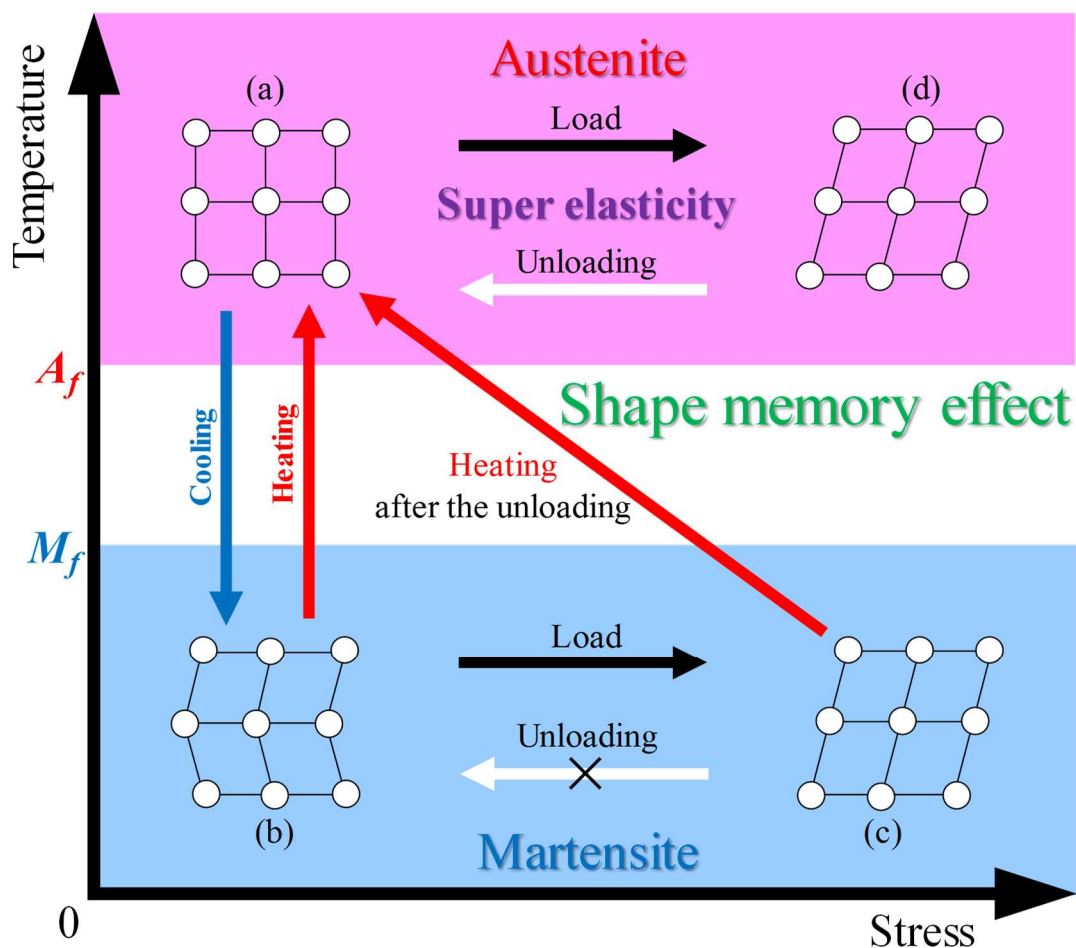


Fig.2.1 Mechanism of shape memory effect ⁽¹⁾

2.2.2 種類と形状

SMAにはチタン・ニッケルをほぼ半々に含む合金の他，コストの安い銅系・鉄系など多種存在するが，発生力や寿命の観点から現在はチタン・ニッケル合金が主流を占めている⁽³⁾。以上は，形状変化が加熱時だけの一方向SMAだが，冷却時の形状も記憶する二方向SMAも存在する⁽⁴⁾。しかし，発生応力が小さく実用化はされていない。形状についてはあらゆる形にできるが，使い良さの観点から直線状とコイル状の2種類が主流になっている。

2.2.3 応用分野

形状記憶効果を利用する応用分野は限られており、温度センサとアクチュエータを兼ねる利点からエアコンの送風案内翼の角度変化や、電子レンジのダンパーの開閉などに利用されている⁽⁵⁾。これに対して、常温大気中でオーステナイト状態を取り続ける超弾性効果は、製品応用の主流になっている。最も有名な商品はブラジャー用で、眼鏡のフレーム・携帯電話のアンテナがこれに続く⁽⁶⁾。近年では、医療用の気道拡張ステントなど少量だが出荷され続けている⁽⁷⁾。

超弾性効果について、Fig.2.1 右上(d)のように SMA は A_f 点以上の母相において応力を加えられ変形すると除荷するだけで形状を回復する。これが超弾性効果であり A_f 点を氷点下に設定され室温で常に超弾性効果を示すように調整された SMA を特に超弾性合金と呼ぶ。超弾性は応力でマルテンサイト変態が誘起される効果であり、チタン・ニッケル合金線材で最大約 8% の大きな回復歪が得られる。これに対し、通常の金属の弾性歪は約 0.1% までで、それ以上の変形を受けると滑り変形し除荷後も塑性歪が残り元に戻ることはない。このため超弾性合金は、ゴム金属とも呼ばれる⁽⁴⁾。

2.3 SMA アクチュエータ

2.3.1 従来研究の紹介

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きた。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。

以下に、従来の SMA アクチュエータの応用例について、その構造から特長をそれぞれ述べる。

2.3.1.1 直線ワイヤタイプ

直線ワイヤタイプの SMA アクチュエータは、入手しやすく取り扱いが容易で発生応力が 300MPa もあるため、SMA がアクチュエータとして利用された最初の例となり多くの研究機関で研究されている。

SMA の回復歪は最大で約 8%であり、繰り返し駆動するアクチュエータには一般に 5%程度に抑えられて使用される。しかしこれは、約 20%以上必要とされる伸縮型リニアアクチュエータの変位量としては小さすぎるため、テコ・プーリー・歯車等の部材を使った変位拡大機構を必要とする。このため大型化し、SMA 本来の小型軽量性を損なうものが多かった。

また、大きな発生力を得るためワイヤ径を太くすると熱容量が大きくなり熱の出入りに時間がかかり応答時間が長くなるため、熱容量の小さい細いワイヤしか使えず実用的な発生力は得られなかった。

SMA の発生変位を大きくするため長いワイヤを用いようとするところを収めるスペースが長大なものになる。そこで、プーリーを多数使って長い SMA ワイヤを何回も折り曲げることで大きな変位を収納しようとした例がある⁽⁸⁾。これは、プーリーを使用することで SMA ワイヤを折り曲げた状態で伸縮できるようにしたもので、大きな変位量はそのままに収納スペースを確保しようとするものである。しかし発生力を大きくするため太い SMA ワイヤを使ったため熱容量が大きくなり応答性が悪かった。この応答性を高め発生力も確保するには細い SMA ワイヤを使う小さなモジュールを多数作って束ね合わせればよい。本来この研究は、生体筋の構造の最小単位であるサルコメアを参考に発生力の単位モジュール「人工サルコメア」を開発することを目的にしたもので当初から量産を視野に入れていた。しかし、プーリーをはじめとする部品点数が多く、小型化には生産・組み立ての面で問題があると考えられる。

2.3.1.2 マイクロマシン

マイクロマシンとは、一般にミリメートルからマイクロメートルオーダーの微小機械や機械構造、センサなどの総称のことを言う。SMA は変位量が小さく、熱容量の小さい用途に向いているとされ、寸法の小さいミリメートル以下で用いられるマイクロマシンへの応用が期待されている。

その適用例として能動内視鏡のアクチュエータがある⁽⁹⁾。これは、屈曲機構に SMA コイルアクチュエータを用いた外径 9mm の CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージャ付内視鏡であり、制御コントローラにより自在な方向と角度に屈曲可能である。この能動内視鏡は必要な時にすぐに使用でき、感染症の危険性がなく洗浄の必要のない使い捨て型内視鏡を目指すものであり、比較的構造が単純で小型 CMOS イメージャも安価なものを使用している。

また、SMA マイクロアクチュエータを用いた視覚障害者用 2 次元ピンディスプレイもある⁽¹⁰⁾。これはコンピュータの文字情報や図形情報を二次元に配列されたピンを上下させて凹凸を作り表示するものでありピンの上下動作は SMA コイルの通電加熱で行う。ピンには磁性体金属チューブが装着されており永久磁石でピンが上側または下側に保持される。ピンを上下させる瞬間だけ通電するため消費電力は抑えられる。各 8 ピンのモジュールで構成され、多数並べることで図形や文字や点字を表示するディスプレイとして使用できる。

この他に、プラズマスパッタリング成膜で SMA 薄膜を作りマイクロマシン用アクチュエータを製作する研究もある⁽¹¹⁾。SMA 薄膜アクチュエータは、表面積が大きく放熱力が大きいので高い応答性が期待されており、応用例としてマイクロスイッチやマイクロバルブなど小型の機械デバイスがある。また、腕時計型血糖値測定用デバイスの血液吸引ポンプ用マイクロダイヤフラムなど実用的なものも検討されている⁽¹²⁾。

2.3.2 応答性改善への取組み

以上, SMA アクチュエータの従来研究について紹介した. これらの共通点は, 応答速度の遅さのため熱容量の小さい小型軽量の特殊用途に限定されている点である. この理由は, SMA の長所である小型軽量性を損なう恐れのある送風ファンなど補器の使用を避けるためである. このため, 大気中に熱を直接放散する自然放冷が主流だった. この応答性改善策として油中に放置する方法⁽¹³⁾や, ヒートシンクに伝熱する受動的な方法⁽¹⁴⁾があった. しかしこれらの方法は, ある程度装置の大型化を避けることができるが, 油やヒートシンクに熱が徐々に溜まるため応答性の改善が継続しない問題があった. そこで, 熱の滞留を防止するため, 空気や油などを流す手法やペルチェ効果を用いる強制冷却の手法が試みられている. ここでは, 本研究においても採用するこの強制冷却について述べる.

2.3.2.1 強制空冷方式

強制空冷方式を適用する場合, 空気を効果的に SMA ワイヤやコイルばねに吹き付けるシステムが必要になる. 具体的には, 送風ファンで風を送る方式が一般的であるが, 常に一定の強さの風を送ることしかできず, SMA の加熱冷却に即時に対応させることはできなかった. これに対し, Fig.2.2 は SMA コイルばねの加熱時は空気流を止め加熱だけに専念し, 冷却時は加熱を止めノズルから噴射した空気流を樹脂製半球状バケットに当て衝動力で SMA コイルばねを引き伸ばすと同時に冷却するシステムで, 加熱と冷却, 発生力とバイアス力を明確に分離することで応答性と効率向上を狙ったものである⁽¹⁵⁾.

実験により, 供給電力 50W で, 変位量 35.3mm, 加熱時約 145ms, 冷却時約 114ms の応答時定数が確認されている. しかし, 空気圧コンプレッサや電磁弁を必要とし装置全体の質量が大きくなるため実用には至らなかった.

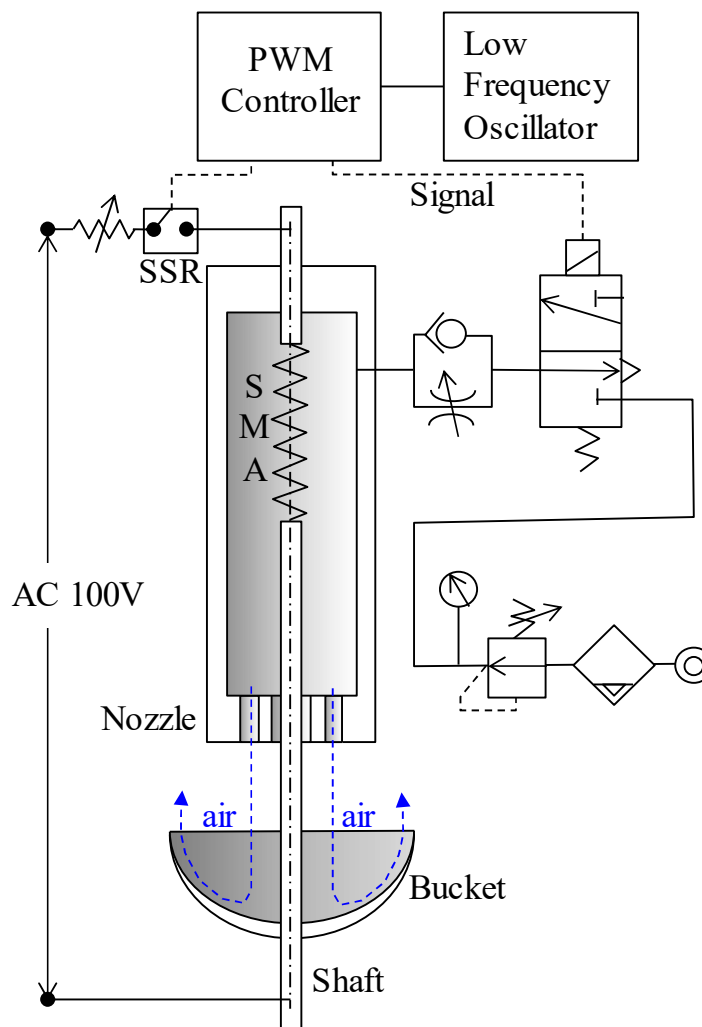


Fig.2.2 SMA actuator that uses the airflow to the cooling and bias force ⁽¹⁴⁾

2.3.2.2 強制油冷方式

水の密度は空気の 1000 倍あるが、電気絶縁のため SMA を放熱の妨げとなる樹脂で被覆しなければならず、絶縁性油で強制冷却する方法が主流となった。

その一例として、細い SMA ワイヤを複数本並列配置したアレイアクチュエータを 2 本拮抗させ油圧制御用スプール弁のスプールの駆動に適用するシステムがある⁽¹⁶⁾。これは、スプール弁内の戻り油流を強制油冷に利用するもので、油圧システムでは容易に実現できる。

実験により、供給電力 53W で、変位量 0.05mm、加熱冷却時 7.96ms の応答時定数が確認されている。しかし、これはあくまで油圧アクチュエータの補器であり、SMA アクチュエータの小型軽量性や柔軟性の特長を生かす用途ではなく従来主流の電磁ソレノイドの代替えにはならなかった。

この他にも、蛇腹状本体ケース中に不活性液体の冷却液を流すことで柔軟性を確保しつつ内部の SMA コイルばねを冷却するシステムがある⁽¹⁷⁾。これは、冷却液を密封状態で循環させるため、本体ケースに蛇腹状シリコンゴムチューブを採用し SMA コイルばねの発生力で伸縮駆動を行うものである。

実験により、供給電力 0.36W で、変位量 10.0mm、加熱時約 18400ms、冷却時約 15800ms の応答時定数が確認されている。しかし、SMA コイルばねを平行に並べ電氣的に直列結線するため、SMA コイルばね同士の接触や絡み合いの防止に、ある程度間隔を置く必要があり、小型化には限度があると考えられる。

2.3.2.3 ペルチエ効果方式

ペルチエ効果（熱電効果）とは、異種の金属線を両端で接合した回路に直流を流すと一方の接合部で吸熱し他方の接合部で放熱する現象で、通電方向を入れ替えるだけで加熱・冷却を行うことができる。サーモモジュールは N 型 P 型の異なる性質を持つ半導体素子を交互に並べ金属板で電氣的に直列に接合したペルチエ素子で加熱面と冷却面をもち病院用の小型冷蔵庫などに用いられる。この加熱と冷却の各面に 1 対の板状 SMA を接触させて加熱冷却を交互に行い拮抗駆動させるアクチュエータが検討されている⁽¹⁸⁾。

実験により、供給電力 7.5W で、変位量 5.0mm、加熱冷却時約 3500ms の応答時定数が確認されている。このアクチュエータは、単純な構造で強制空冷のような大型の補器を必要としない特長があるが、連続的繰返し動作には向かず、単発的ステップ駆動に限られる問題がある。

2.3.2.4 各強制冷却方式の比較

以上紹介した強制冷却方式について Table 2.1 にまとめ比較した。強制冷却の媒体を項目に変位量・加熱時と冷却時の時定数・入力電力について比較した。時定数だけで比較すると強制油冷方式が最高だが、変位量がマイクロメートルオーダーで油圧機器の部品であり SMA アクチュエータの有効性が生かされていないと考える。不活性液体方式とペルチエ効果方式について、装置の小型軽量化に有効であるが、時定数がまだ大きく改善の余地があると考え。変位量と時定数の面から強制空冷方式が有効だが、空気圧制御機器が付随するため、SMA アクチュエータの有効利用にはなっていない。以上より、これらどの方式にも一長一短があることがわかった。

Table 2.1

Media of forced cooling	Displacement (mm)	Time constant at heating (ms)	Time constant at cooling (ms)	Input power (W)
Air	35.3	145	114	50
Oil	0.05	7.96	7.96	53
Inert liquid	10.0	18400	15800	0.36
Electron (Peltier)	5.0	3500	3500	7.5

2.4 本章のまとめ

本章では、SMA に関する基礎事項としてマルテンサイト変態による形状記憶効果により発現する収縮機構とその種類と形状と応用分野を紹介した。

次に、従来の SMA アクチュエータを紹介し、それらの用途・構造・駆動方法・問題点・改善の取組みについて説明した。

参考文献

- (1) 宮崎修一：形状記憶合金のしくみ，パリティ， Vol. 19, No. 2, pp. 11-16, 2004.
- (2) 形状記憶合金協会：トコトンやさしい形状記憶合金の本，日本工業新聞社， pp. 12-15, 2016.
- (3) 吉田一也，菊池駿一：鉄系及び銅系形状記憶合金線の伸線性向上，日本機械学会論文集（C編），76巻767号， pp. 211-214, 2010.
- (4) 和栗創一，上中玲子，中島尚正，村上存：二方向性形状記憶合金を用いたマイクロファクトリ用マイクログリッパの開発，日本機械学会論文集（C編），68巻668号， pp. 205-212, 2002.
- (5) 船久保熙康：形状記憶合金，産業図書， pp. 176-178
- (6) 形状記憶合金協会：トコトンやさしい形状記憶合金の本，日本工業新聞社， pp. 100-107, 2016.
- (7) 中村達雄，清水慶彦，奥村典仁，有安哲哉，清谷哲也，滝本行延，寺町政美：形状記憶合金ステントを用いた気道狭窄治療への新しいアプローチ，第15回日本気管支学会総会 シンポジウムⅡ， pp. 795-798, 1992.
- (8) 三宅仁：人工筋肉，人工臓器，27巻5号， pp. 684-689, 1998.
- (9) 牧志渉，松永忠雄，竜新栄，江刺正善，芳賀洋一：形状記憶合金コイルによる屈曲機能を備えたディスプレイ電子内視鏡，第47回生体医工学会大会，Japan Soc. ME&BE (May.2008), pp. 928-929, 2008.
- (10) 芳賀洋一，松永忠雄，水島昌徳：形状記憶合金マイクロアクチュエータを用いた視覚障害者用2次元ピンディスプレイ，日本機械学会第3回福祉工学シンポジウム講演論文集， pp. 197-199, 2003.

- (11) 森山健二：熱膨張型マイクロバルブとその応用，油空圧技術，日本工業出版，Vol. 42, No. 6, pp. 19, 2003.
- (12) 西村浩平，槌谷和義，上辻靖智：MEMS 用 TiNi-SMA 薄膜アクチュエータの最良形状の探索，2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，pp. 561-562, 2010.
- (13) 足立孝太郎，中里裕一，有賀幸則：冷却効率を考慮した形状記憶合金アクチュエータシステムの開発，第 17 回ロボット学会学術講演会，pp. 965-966, 1999.
- (14) 斎藤克彦，堂埜茂，後藤孝夫：形状記憶合金アクチュエータ，特許出願公開番号：特開 2005-155427 (P2005-155427A)，公開日：平成 17 年 6 月 16 日 (2005. 6. 16)，IPC: F03G 7/06
- (15) 石川敏也，島田公雄：空気圧制御による形状記憶合金の動特性の研究，昭和 60 年度精機学会秋季大会学術講演会論文集，pp. 1-2, 1985
- (16) 横田眞一，吉田和弘，坂東賢一，須原正明：形状記憶合金アレイアクチュエータを用いた小形比例弁，日本機械学会論文集 (B 編)，62 巻 593 号，pp. 224-229, 1996.
- (17) 谷口浩成，神橋政士，橋本篤徳：不活性液体による冷却機構を有する小型 SMA アクチュエータの試作，日本 AEM 学会誌，Vol. 22, No. 2, pp. 274-279, 2014.
- (18) 齊藤春雄，竹前忠，矢野健太郎：サーモモジュールを応用した形状記憶合金アクチュエータの研究，日本機械学会論文集 (C 編)，58 巻 545 号，pp. 133-137, 1992.