

博士論文

Ti-Ni ならびに **Fe** 系形状記憶合金を用いた
新型アクチュエータの開発に関する研究

A study on development of new actuators using
a Ti-Ni shape memory alloy (SMA) and an Fe-based SMA

横浜国立大学大学院

工学府

システム統合工学専攻

海洋宇宙システム工学コース

畑村望宇

Miu Hatamura

2016 年 3 月

Abstract

In recent years, as advance of the technology, the research of the materials whose properties autonomously change depending on the surrounding environment is carried out flourishingly. These are called intelligent materials or smart materials. Development of the machine system using such materials attracts much attention. One of the materials which has large advances most in the intelligent material is shape memory alloys (SMAs). At the present passing more than half a century after it was discovered, the development of the actuator using the SMAs is carried out flourishingly and the practical use advances as intelligent metal materials in various fields, such as automotive, aerospace, robotics and biomedical, using the high mechanical characteristics, i.e., the stability of the shape memory effect or ductility, the strength, corrosion-resistant. Especially, the actuators using SMAs attract much attention in characteristics that output stress at the time of the shape recovery is very large and that drive sound is very quiet. One of the demerits of SMAs is that the maximum output strain is limited to approximately 5 %. Therefore, in this study the development of unprecedented new actuators was carried out by changing the shape and the structure of the SMA.

- (1) The most of the actuator of SMA put to practical use are linear actuators until now. Therefore, the torque actuator of the new mechanism using SMA was developed, and the output characteristics of the torque actuator was clarified.
- (2) Knitting actuators were produced using only Ti-Ni SMA wires with maximum output strain of only 5%, and we succeeded in getting the output strain of more than 100%. In addition, the mechanical characteristic and the difference in output properties by how to knit were clarified.
- (3) A disk spring type actuator was produced using Ti-Ni shape-memory alloy, and static mechanical properties were clarified. In addition, the finite element analysis of the produced disk spring type actuators was carried out, and the validity was confirmed by the comparison with the experimental results and analysis results.

The disadvantage of Ti-Ni SMA is that cost is very high. On the other hand, if Fe-based SMA is produced in mass quantities, the cost can be reduced to about 1/10 to 1/20 times of that of Ti-Ni SMA. However, it has been until now that the shape memory effect has can be activated only once. Because recovery properties improved by recent studies, we considered that the expression of the shape-memory effect may be possible repeatedly. Based on the assumption, I performed a repetitive shape recovery experiment of the Fe-based SMA, and confirmed possibilities of repetitive actuator by limiting the pre-strain less than 1%.

目次

SMA を用いた新型アクチュエータの開発に関する研究 (仮)

第1章 序論

- 1.1 研究背景
- 1.2 アクチュエータについて
- 1.3 SMA について
- 1.4 SMA の種類
- 1.5 SMA の応用
- 1.6 研究目的

第2章 コイル型 Ti-Ni SMA を用いたトルクアクチュエータ

- 2.1 研究目的
- 2.2 材料特性測定実験
- 2.3 SMA トルクアクチュエータの駆動原理
- 2.4 リニアアクチュエータによる予備実験
- 2.5 SMA トルクアクチュエータの設計
- 2.6 SMA トルクアクチュエータの駆動実験
- 2.7 考察

第3章 Ti-Ni SMA ねじりばねを用いたトルクアクチュエータ

- 3.1 研究目的
- 3.2 SMA トルクアクチュエータの概要
- 3.3 SMA トルクアクチュエータの駆動原理
- 3.4 材料特性測定実験
- 3.5 SMA トルクアクチュエータ
- 3.6 SMA トルクアクチュエータの駆動実験
- 3.7 考察

第4章 Ti-Ni SMA を用いた編目型アクチュエータ

- 4.1 研究目的
- 4.2 編目型アクチュエータの概要
- 4.3 編目型試料の材料特性測定実験
- 4.4 出力測定実験
- 4.5 考察

第 5 章 Ti-Ni SMA を用いた皿ばね型アクチュエータ

- 5.1 研究目的
- 5.2 皿ばねの概要
- 5.3 SMA 皿ばね
- 5.4 SMA 皿ばねの駆動実験
- 5.5 SMA 皿ばねの解析
- 5.6 性能評価

第 6 章 鉄系 SMA を用いた二方向性アクチュエータ

- 6.1 鉄系 SMA について
- 6.2 鉄系 SMA の繰り返し形状記憶効果に関する実験
- 6.3 二方向性アクチュエータの設計
- 6.4 二方向性アクチュエータの作動実験

第 7 章 結論

参考文献

謝辞

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、科学技術の発展に伴い、材料自体が環境や状態などの変化に応じて自律的に機能するインテリジェント材料もしくはスマート材料と呼ばれる材料の開発が盛んになっている。このような材料を用いた機械システムの開発が、将来の産業基盤の構築に不可欠なものと注目を集めている。インテリジェント材料の中で、最も開発が進んでいるもののひとつが形状記憶合金(Shape memory alloy: SMA)である。

SMA とは、自らの形状を記憶することができ、負荷を与え形状が変化しても、加熱することにより元の形状に戻る形状記憶効果と超弾性効果を発現する金属のことである。SMA の形状記憶効果は、1959 年に Ti-Ni 合金において発見され、これまで様々な研究が行われてきた[1]。1969 年、U.S. Navy F-14 ファイターのパイプの締結で初の実用化に成功した[2]。SMA が発見されてから半世紀以上がたつ現在も SMA の研究は盛んに行なわれており、形状記憶効果の安定性や延性・強度などの機械的特性、さらには耐食性にも優れているという特性を生かしインテリジェント金属材料としてバイオメディカル分野を中心に実用が進んでいる。これまで 20 種類ほどの SMA が開発されたが、その中で現在主流となっているのが Ti-Ni SMA である。Ti-Ni SMA は、形状回復特性、疲労特性に優れており、機能性金属材料として様々な分野で実用化されている。その中でも注目されているのがアクチュエータとしての機能である[3, 4, 5, 6]。

アクチュエータは大きさや反応速度、コストなどの様々な商業的制限を克服しなければならない。SMA は発生応力が非常に高く、エネルギー密度が大きいとされている。また、他のインテリジェント材料と比べて、形状・構造を比較的自由に設計することができる。一方、反応速度が遅く、回復ひずみが小さいという問題がある[7, 8]。そこで本研究では、SMA の構造を設計することにより、SMA を用いたアクチュエータが抱える問題を解決することを目的とする。また、Ti-Ni SMA はその原料金属から、コストが高いという問題がある[9, 10]。最後に Ti-Ni SMA と比べて圧倒的に安価な鉄系 SMA の繰り返し形状記憶効果について調査し、鉄系 SMA のアクチュエータへの応用の可能性を示す。

1.2 アクチュエータについて

現在、アクチュエータは電動モータを用いるのが主流である。1873年に電動モータが発明されて以来、様々な改良が施され、現在では洗濯機から自動車の主動力など身の回りの多くのものにモータが用いられている。しかしモータを用いるとアクチュエータの機構が複雑になり簡素化し辛い、重量の増加、機械音が伴う等の問題が発生する。その他のアクチュエータとして圧搾空気を用いる方式などがあるが、この場合もアクチュエータとは別にコンプレッサが必要になる等機構の大型化・重量の増加が発生する[8]。その中近年研究開発が進んでいるインテリジェントマテリアルが注目を集めている。表 1.1 は現在研究されているインテリジェントマテリアルの主なものである[11]。表 1.1 のようにインテリジェントマテリアルには数多くの種類が存在するが、それぞれに利点と欠点があり、その中で実用化に至っているものは、形状記憶ポリマと SMA である。形状記憶ポリマは高温状態ではゴムのように柔らかく、冷却するとガラスのように硬くなりその形状が固定される材料である。

Table 1.1 Intelligent material under development [11]

インテリジェント材料		発生応力	変位	作動速度	特徴	問題点	現状
高分子材料	ポリマゲル	0.3MPa	40%	0.1Hz	・伸縮性が大きい ・形状保持	・応答速度が低い ・耐久性が低い ・水等の溶剤が必要	研究段階
	ICPF	0.1MPa	10%	50Hz	・駆動電圧が低い ・高速応答性 ・耐久性が高い	・屈曲動作のみ ・停止不可 ・電解質の保持 ・発生力が小さい	研究段階
	誘電性ポリマ	5MPa	10%	5Hz	・形状保持が容易 ・効率が高い ・小型化しやすく軽量	・耐久性が低い ・電解質の保持	研究段階
	圧電ポリマ	4MPa	0.20%	0.1Hz	・高速応答性 ・ドライ環境で駆動	・発生力が小さい ・変位が小さい	研究段階
	電歪ポリマ	3~7MPa	100%	10~1000Hz	・高速応答性 ・変位が大きい ・低コスト ・ドライ環境で駆動	・高歪時の耐久性が低い ・印荷電圧が高い	研究段階
形状記憶材料	SMA (Ti-Ni)	300MPa	5%	0.2Hz	・発生力が大きい ・高伸縮構造構成が容易	・応答性が低い ・エネルギー効率が悪い ・変位が小さい	実用化済
	形状記憶ポリマ	4MPa	100%	0.1Hz	・変位が大きい ・柔軟素材	・応答性が低い ・エネルギー効率が悪い ・発生力が小さい	実用化済

SMA はさきで述べたように負荷を与え形状が変化しても、加熱することにより元の形状に戻る金属である。SMA の単位体積あたりの仕事は、 piezo 素子や電磁気力などの他のアクチュエータ素子と比べ 100 倍程度大きく、SMA の応用は今後ますます多くなると考えられている。

1.3 SMA について

一般に金属は外力を与えられ降伏応力を超えて塑性変形すると図 1.1 のように結晶面に境に原子の格子がずれることによるすべり変形が発生し、除荷してもひずみが残る。しかし SMA は、いったん形状を記憶させると外力を加えて形状を変化させても、加熱（ジュール加熱）することで元の形状に戻る。この現象を形状記憶効果と呼ぶ。この現象は、高温時に安定なオーステナイト構造と低温時に安定なマルテンサイト構造の 2 つの結晶構造間の相変態から発生している。図 1.2 の①から②のように、高温側で優位なオーステナイト相を冷却するとマルテンサイト相に変態する。これをマルテンサイト変態と呼び、この変態は原子個々ではなく全体として連携を保ち原子間の相対的位置関係は変わらない無拡散変態である。マルテンサイト変態を起こすと多数の方位の異なるマルテンサイト結晶が生成される。ここに外力が加わると、②から③のように外力に対して最も安定な方向にバリエントが成長する。これをバリエントの再配列と呼び、これにより見かけの塑性変形が起こるが、加熱して逆変態が起こると完全に元の結晶格子に戻り形状が回復する。これが SMA の形状回復効果のメカニズムである[12, 13, 14]。

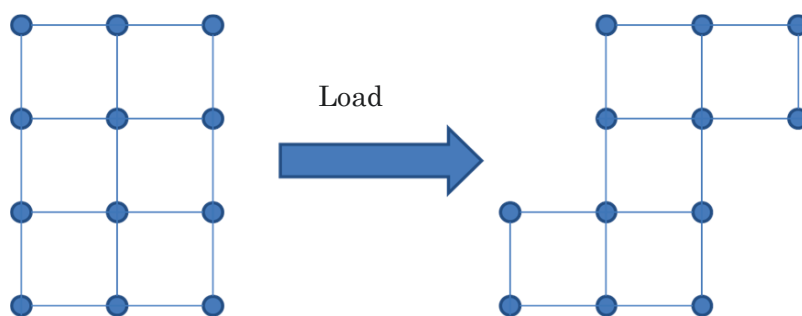


Fig. 1.1 Atom model of the permanent strain by the slipping

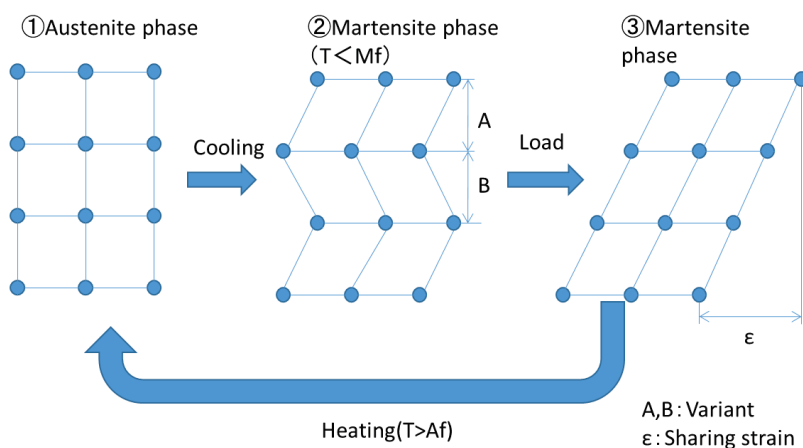


Fig. 1.2 Atom model of the shape memory effect by the martensite transformation

1.4 SMAの種類

表 1.2 にこれまでに報告のある SMA を示す[15]。これまでに数多くの SMA に形状記憶効果が認められている。しかし、現状で実用化されている SMA はそのほとんどが Ti-Ni SMA である。この理由としては、Ti-Ni SMA は優れた形状記憶特性を示すことが挙げられる。また、耐疲労特性にも優れており、曲げ試験では 480MPa で 2.7×10^7 回の寿命があり、引張り試験では疲労限が 400MPa とされ、マルテンサイト変態が伴う場合でも 10^7 回を超

Table 1.2 Various kinds of shape-memory alloys [15]

合金	組成(原子%)	結晶構造	ヒステリシス(°C)
Ag-Cd	44-49Cd	B2-2H	~15
Au-Cd	46.5-50Cd	B2-2H	~15
Cu-Zn	38.5-41.5Zn	B2-9R rhom.M9R	~10
Cu-Zn-X (Si,Sn,Al,Ga)	数%X	B2(D0 ₃)-9R M9R(18R)	~10
Cu-Al-Ni	28-29Al, 3-4.5Ni	D0 ₃ -2H,18R	~35
Cu-Sn	~15Sn	D0 ₃ -2H,18R	—
Cu-Au-Zn	22-28Au, 45-47Zn	L2 ₁ ,18R	~6
Ni-Al	36-38Al	B2-3R	~10
Ti-Ni	49-51Ni	B2-monoclinic B2-rhom	20~100 1~2
In-Tl	18-23Tl	fcc-fct	~4
In-Cd	4-5Cd	fcc-fct	~3
Mn-Cu	5-35Cu	fcc-fct	—
Fe-Pt	~25Pt	L1 ₂ -規則 bct	小
Fe-Pd	~30Pd	fcc-fct	小
Fe-Ni-Co-Ti	33Ni,10Co,4Ti (重量%)	fcc-bct	小
Fe-Ni-C	31Ni,0.4C (重量%)	fcc-bct	大
Fe-Mn-Si	~30Mn,~5Si (重量%)	fcc-hcp	大
Fe-Cr-Ni-Mn-Si-Co	~10Cr,<10Ni, <15Mn<7Si<15Co (重量%)	fcc-hcp	大

える寿命がある。延性、靱性、耐食性においても実用化に耐え得る特性を有している。その他、現在研究が進められているものに鉄系 SMA がある。鉄系 SMA は Ti-Ni SMA と比べ 1/10 から 1/20 程度のコストで製造できるとされており、強度や耐食性の改善に向け合金の成分設計の研究が進められてきた[16, 17]。

1.5 SMA の応用

以下に現在の応用例をいくつか挙げる[15]。

もとに戻る力で締め付ける

「ある温度」が室温より低い SMA で作ったパイプ継ぎ手に、その温度より低い温度で変形を加えて広げ、内側にパイプをはめてつなぐと、室温にもどる時に継ぎ手はもとの寸法に収縮し、大きな力でパイプを締め付けるので、ねじ止めなどを使わない簡素な構造の配管が実現できる。油圧関係の配管に使われた例では高い信頼性と点検修理の容易さが示されている。

熱エンジンへの応用の可能性

熱効率が低いことなど、まだまだいろいろな課題が残されているが、今までに熱エネルギーとして利用されていなかったような低い温度差で SMA を作動させることによって熱エンジンを構成することができる。

家庭用電気製品

エアコンの吹き出し口が温風の時に下向きに冷風の時に上向きになるように切り換える仕組みや、お湯が十分沸いてからドリップを始めるためのコーヒーマーカーの弁、電気炊飯器の圧力弁にも SMA のばねが使われている。

電流で加熱してロボットの腕を動かす

SMA に位置や力のセンサの働きを組み合わせると、通電加熱による駆動で制御できるアクチュエータとなる。このメカニズムは単純で小型化に適することから、ロボットなどのメカトロニクス分野での応用が進んでいる。その他、医学方面への応用も広がっており、内視鏡やカテーテルなどの機構の一部として採用されている。

超弾性として歯科などの医療分野や生活用品の一部として使用

SMA の整形外科への応用として、骨折した骨の内部にピンとして挿入し骨を固定するものや、骨の結合用に使われるものがある。また、歯列矯正用には、歯が痛くない程度のほど良い力を加えられる超弾性ワイヤが使われておりこの方法では巻爪治療にも使用されている。超弾性ワイヤとしては、ブラジャーのワイヤや携帯電話などのアンテナ部分に使用されている。

1.6 研究目的

本研究では、主に Ti-Ni SMA の構造を設計することにより、Ti-Ni SMA を用いたアクチュエータが抱える問題を解決し、Ti-Ni SMA アクチュエータの新たな応用の可能性を示すことを目的とする。

第二章と第三章では、SMA を用いて、高トルクを発生できる新機構のトルクアクチュエータの設計開発を行った。具体的には、第二章でコイル状に加工した Ti-Ni 形状記憶合金と、同様にコイル状に加工した Ti-Ni 超弾性合金をバイアスとして組合せ、SMA の高温時と低温時の縦弾性係数の差を利用し、コイルの線方向の変位により駆動する高性能トルクアクチュエータを開発し、その有用性を検討した。その結果、理論値と実験値で大きな差が生まれ、想定した出力は得られなかった。その為、第三章では、SMA ねじりばねの回転運動を直接利用できるアクチュエータを設計製作し、その出力特性を明らかにした。その結果、既存のロータリーアクチュエータの出力を上回る熱駆動型トルクアクチュエータの開発に成功した。

第四章では、SMA の回復ひずみがわずか 5%であり、他のリニアアクチュエータと比べ回復ひずみが小さいという問題を克服するため、Ti-Ni SMA ワイヤを用いて編目型アクチュエータを製作し、100%以上の出力ひずみを得ることに成功した。また、編み方による出力特性の違いとその機械特性を明らかにした。

第五章では、Ti-Ni 形状記憶合金を用いて皿ばね型アクチュエータを製作し、その静的な力学特性を実験により調査した。また、製作した皿ばね型アクチュエータの有限要素法解析を行い、実験結果との比較によりその妥当性を検証すると共に、皿ばねの重要なパラメータである h/t と出力特性の関係について調べることで性能評価を行った。

また、第五章まで用いた Ti-Ni SMA はその原料金属から、コストが高いという問題がある [9, 10]。最後に Ti-Ni SMA と比べて圧倒的に安価な鉄系 SMA の繰り返し形状記憶効果について調査し、鉄系 SMA のアクチュエータへの応用の可能性を示す。

第2章 コイル型 Ti-Ni SMA を用いたトルクアクチュエータ

2.1 研究目的

本研究の目的は Ti-Ni SMA を用いてこれまでにない高トルクのトルクアクチュエータを設計開発することである。具体的にはコイル状に加工した Ti-Ni 形状記憶合金と、同様にコイル状に加工した Ti-Ni 超弾性合金をバイアスとして組合せ、SMA の高温時と低温時の縦弾性係数の差を利用した熱駆動型の高性能トルクアクチュエータを開発し、その有用性を検討する。

SMA を用いたトルクアクチュエータは、回転数は制限されるものの静音性に優れ、同じ大きさのモータと比べても格段に高い発生トルクを得られると考えられる。

2.2 材料特性測定実験

2.2.1 試験片

本研究では、市販の株式会社アクトメント製未記憶 SMA ワイヤ WDL4-12(直径 1.2mm Ni56.06 wt%)を用いてトルクアクチュエータの設計を行う。この材料は形状未記憶のため、形状記憶処理は熱処理設定温度 550℃、熱処理時間 40 分、水冷で、超弾性処理は熱処理設定温度 410℃熱処理時間 40 分水冷で行った。図 2.1 に同等の製品のメーカーが発表している熱処理温度と変態点の関係を示す[18]。図 2.1 の横軸は熱処理温度を示しており、縦軸はその条件で熱処理した場合の変態温度を示している。凡例の A_s はオーステナイト変態開始温度、 A_f はオーステナイト変態完了温度、 M_s はマルテンサイト変態開始温度、 M_f はマルテンサイト変態完了温度を示している。

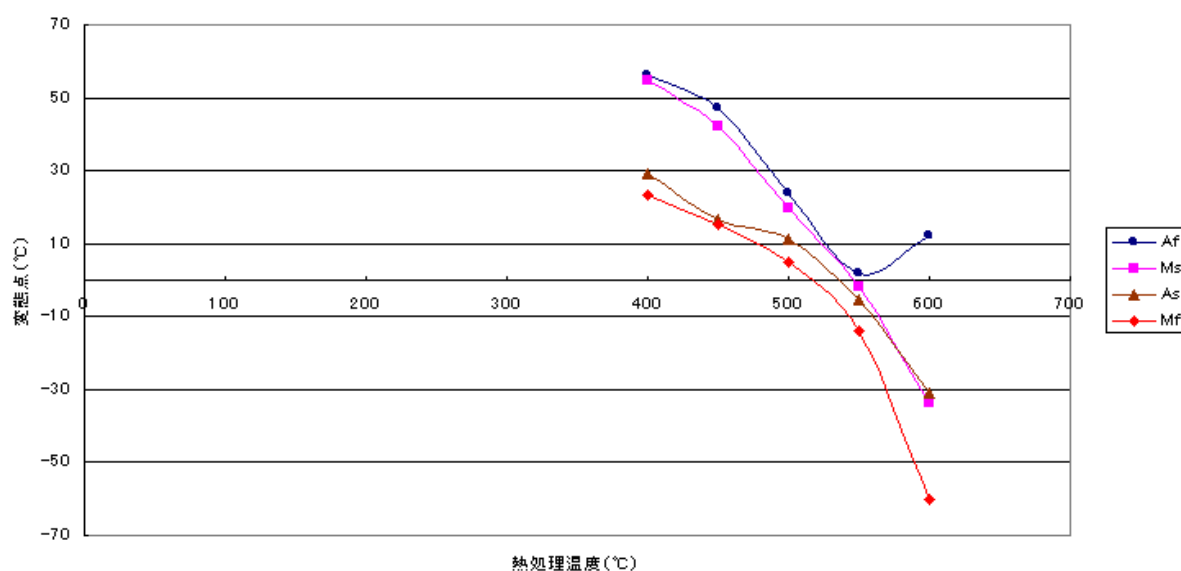


Fig. 2.1 Non-memory Ti-Ni shape-memory alloy wire WDL4-12 produced made in Actment Co., Ltd [18]

2.2.2 実験目的

上記の Ti-Ni SMA ワイヤを用いて一軸引張試験を行い、機械特性・引張挙動の測定を行う。

2.2.3 実験方法

引張試験を行うために上記の Ti-Ni ワイヤを 10cm の長さに切り取り直線状に拘束し電気炉(ヤマト科学製 FO610)を用いて形状記憶処理を行う。形状記憶処理したものと超弾性処理したものをそれぞれ用意し、引張試験を行う。

オートグラフ (島津製作所製 AG-IS 250kN) に試験片を設置し、軸方向に荷重をかけて

いき、ひずみ計(島津製作所製)の標点距離 50mm の伸びが指定の長さ 2.5mm(5%伸び)に達したら除荷を行う。

この間に荷重をオートグラフで、伸びをひずみ計にて測定し、荷重—伸び線図を作成する。形状記憶処理したものは、低温 (スポットクーラを使用(約 10°C))で 5%伸ばした後、除荷を行い、余ひずみが残った状態で工業用ドライヤを用いてワイヤを加熱し(約 150°C)再び除荷を行う。

超弾性合金は、室温(13°C)で 5%伸ばした後、除荷を行う。

2.2.4 実験結果

引張試験の結果から得られた Ti-Ni SMA と超弾性合金の荷重-伸び線図を図 2.2 と図 2.3 に示す。図 2.2 のように 2.5mm (5%) の引張ひずみを与え、除荷すると 0.5mm の弾性ひずみが回復し、その後加熱・除荷することにより完全に形状回復した。また、図 2.3 のように超弾性合金は除荷すると完全に形状回復した。

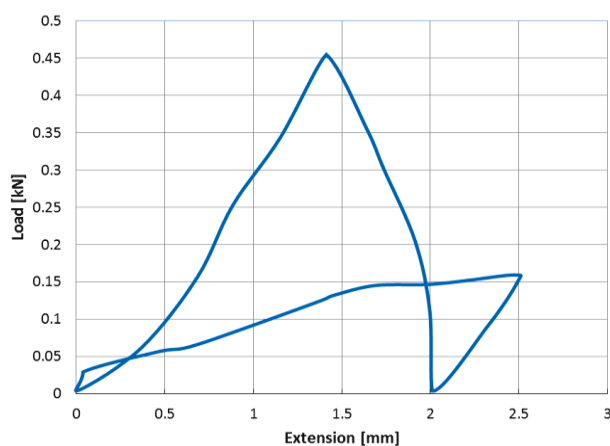


Fig. 2.2 Load - extension curve of the shape-memory alloy (Low temperature)

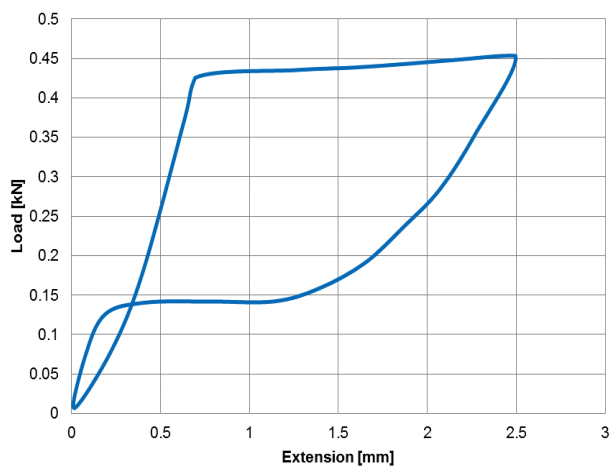


Fig. 2.3 Load - extension curve of the super-elastic alloy (High temperature)

2.3 SMA トルクアクチュエータの駆動原理

2.3.1 ワイヤの伸びを用いた 2 方向アクチュエータ

今回設計する Ti-Ni SMA トルクアクチュエータの原理を説明するために、まずはその簡易形である 2 方向アクチュエータの作動原理について説明する[1]。

通常 1 方向性しか示さない Ti-Ni SMA であるが、バイアスとして Ti-Ni 超弾性合金と組み合わせることで 2 方向性を得ることができる。これはこの合金が高温側の母相(オーステナイト相)で強い(硬く、降伏応力が高い)、低温側のマルテンサイト相で弱い(軟らかく、降伏応力が低い)という性質を利用している。

まず低温状態で引張により歪みを生じさせた形状記憶ワイヤ端と通常長さの超弾性ワイヤ端を固定し、図 2.4 の上の直線のように両端をそれぞれ固定する。

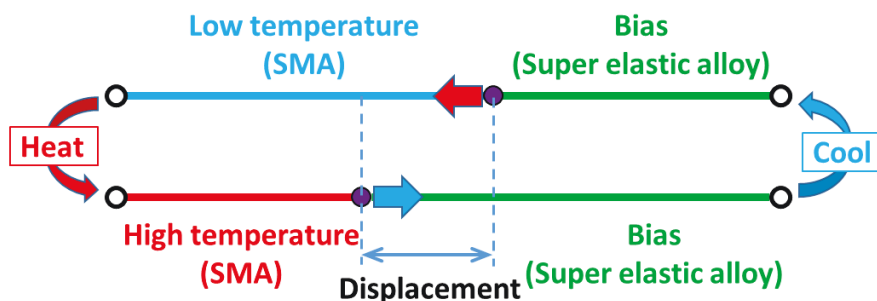


Fig. 2.4 Outline of the drive of the bidirectional actuator

この状態で SMA ワイヤを加熱し高温になると、SMA ワイヤは母相に戻り通常長さに戻ろうとする。その際に超弾性ワイヤを引っ張る方向に荷重が発生し、両ワイヤの荷重が釣り合った点でバランスする。

SMA ワイヤが再び低温になるとマルテンサイト相に変態するので軟らかくなり、超合金ワイヤの元の形状に戻ろうとする性質によって発生する荷重によって引っ張られ、荷重が釣り合った点でバランスする。

高温時と低温時のバランス点の差がこのアクチュエータの変位となる。このようにして 2 方向動作を得ることができる。

2.3.1 トルクアクチュエータの駆動原理

これまでの SMA を用いた 2 方向アクチュエータの駆動は図 2.4 のような直線運動である。ここでは、本研究で開発するトルクアクチュエータの駆動原理について説明する。今回設計するトルクアクチュエータは Ti-Ni SMA ワイヤをコイル状に形状記憶して使用する。両ワイヤはコイル形状をしているが一般的に用いられる引張圧縮コイルの性質(コイルのコイル長方向のひずみ)は使用しない。

図 2.5 のような構造を考える。板②と板③は支柱によって固定されている。シャフトは板②と板③に設置されたベアリングによって支えられている。また板①とシャフトは固定さ

れており、シャフトと共に板①も回転する。また 2 種類の外径の円筒が板②に固定されている。

引張によって線方向に歪みを与えた Ti-Ni SMA コイルを外側の円筒まわりに、また逆回転に巻いた Ti-Ni 超弾性合金コイルをバイアスとして内側の円筒まわりに設置する。各 Ti-Ni 合金コイルの片端を板①に、もう片端を板②にそれぞれ固定する。

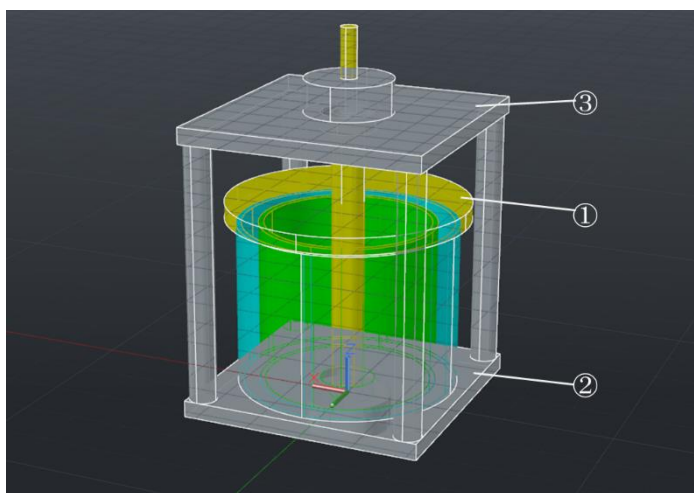


Fig. 2.5 Basic structure of the torque actuator

駆動原理は 2 方向アクチュエータと同一で、SMA ワイヤの高温時低温時の引張荷重の差を利用している。

図 2.6 のように、外側に配置された Ti-Ni SMA コイルを加熱する際に、2 方向アクチュエータの場合と同様に歪みが回復しようとする。その際に板①はシャフトを中心とした回転運動を行う。板①が回転することによって、逆回転に巻かれた Ti-Ni 超弾性合金コイルは引張方向の荷重を受け、歪みが発生する。そして荷重の釣り合った点でバランスする。外側の SMA コイルを冷却することによって、超弾性合金の形状回復方向の荷重によって、加熱時とは逆の方向に板①は回転する。

このように、Ti-Ni ワイヤをコイル状に形状記憶し上下の回転可能な板に固定することで、前述の 2 方向アクチュエータの直線運動が回転運動に変換される。これが今回の研究で発案されたトルクアクチュエータの駆動原理である。

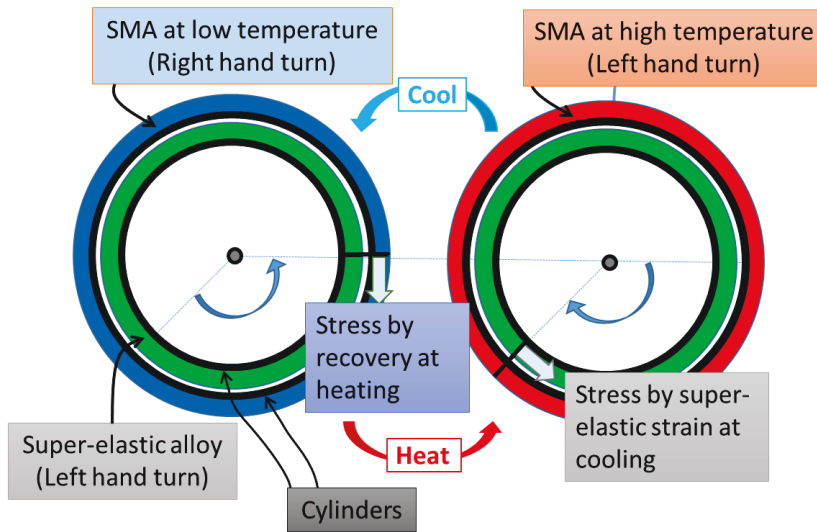


Fig. 2.6 Drive principle of the torque actuator

2.4 リニアアクチュエータによる予備実験

2.4.1 実験目的

トルクアクチュエータの設計にあたって、トルクアクチュエータの駆動の変位(回転角)を推定するために2方向アクチュエータの変位の測定を行う。

2.4.2 実験方法

$L_f=100\text{mm}$ の Ti-Ni SMA ワイヤに 5%歪みを発生させ長さ $L=100\text{mm}$ にして、ワイヤと自然長 $l=100\text{mm}$ の Ti-Ni 超弾性合金ワイヤをサーキュラースリーブ(円柱の中に二本のワイヤを通し円柱側面から3本のねじで固定するパーツ)を用いて連結する。連結したワイヤの両端をオートグラフのクリップ部に固定する。図 2.7 に設置の概略図を示す。

この状態から、形状記憶合金部分を工業用ドライヤで約 150°C に加熱後、スポットクーラで約 10°C まで冷却する。このサイクルを繰り返し、各温度での形状記憶合金ワイヤの長さ L を計測する。

2.4.3 実験結果

初期固定状態から形状記憶合金部分を家庭用ドライヤで加熱した際に $L=103\text{mm}$ を示した。次に形状記憶合金部分をスポットクーラで冷却した際に $L=104\text{mm}$ を示した。

その後、加熱と冷却を繰り返したが両温度のバランス点は上記の位置を繰り返し移動した。

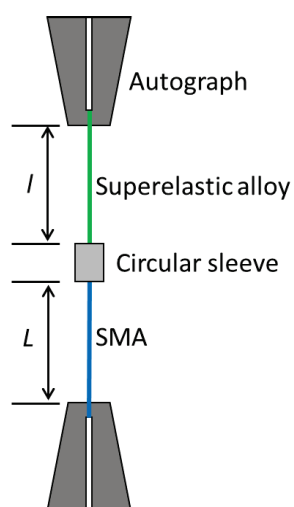


Fig. 2.7 Schematic drawing showing the experimental setup

2.4.4 考察

結果より形状記憶合金ワイヤの初期ひずみ 5% に対して、高温時⇔低温時の温度変化時にそれぞれ約 1% の変位が確認できた。

この結果から考えると、摩擦のない理想的な値では、トルクアクチュエータの変位でも同じことがいえる。コイル 1 巻きにつき 1%、つまり $3.6[\text{degree}]$ の回転角が期待できる。またワイヤ長さと変位は比例関係にあるので巻き数を増やせばその分回転角も増加する。

2.5 SMA トルクアクチュエータの設計

トルクアクチュエータの性能に直接影響を及ぼすのは2種類の円筒のサイズである。円筒の高さによって設置することのできるTi-Ni SMA コイルの巻き数が増える。

今回設計するにあたって、Ti-Ni SMA コイルのアクチュエータ本体への固定方法が大きな問題となった。コイルの巻き数を変更して繰り返し実験を行う必要があったので、比較的付け外しが簡単に行えるように、2方向アクチュエータによる予備実験でも用いたサーキュラースリーブを用いた。図2.8の中段の円盤から円盤を貫通させるようにコイルのワイヤ端を出し固定したため、当初は円筒の高さは40[mm]を予定していたが、サーキュラースリーブを上部四角板とシャフトに固定された円板の間に入れるスペースを設けるために円筒の高さを25[mm]に変更した。製作したトルクアクチュエータのSMA コイル固定器を図2.8に示す。

使用するTi-Ni コイル($\phi 1.2$ [mm])の最大巻き数は20巻きまで可能である。

2種類の円筒は外径40[mm]、32[mm](どちらも肉厚1mm)を使用した。

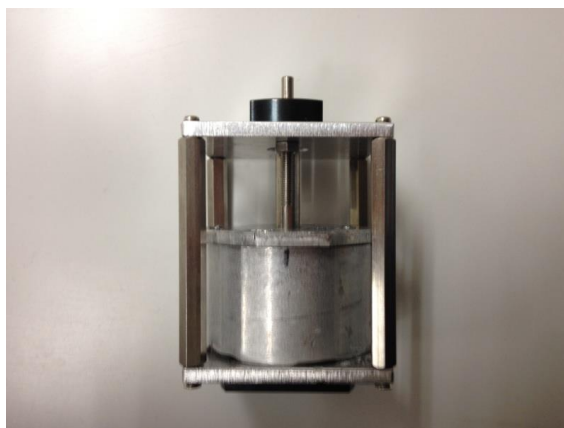


Fig. 2.8 Photograph of the torque actuator

2.6 トルクアクチュエータの駆動実験

2.6.1 実験目的

設計製作した上記のトルクアクチュエータを実際に稼働させその変位を計測する。また軸の回転を固定し、その時発生したトルクの計測を行う。Ti-Ni SMA コイルの巻き数を1巻きから始め、その後増やしていき各巻き数にて計測を行う。

2.6.2 実験方法

線方向に5%のひずみを与えたTi-Ni SMA コイル(コイル径42mm)をトルクアクチュエータの外側の円柱に、Ti-Ni 超弾性コイル(コイル径34mm)を内側の円柱にサーキュラースリーブを用いてそれぞれ固定する。

その状態から加熱と冷却を行い、釣合いの位置を決定する。その後、工業用ドライヤにて約120℃まで加熱し、その時の駆動角度を計測する。

また、図2.9のように冷却状態でトルクメータUTM-30Nm(ユニパルス株式会社)を介してシャフトを固定し、加熱することにより、回転角0[degree]の時の静止トルクを測定する。コイルの巻き数は、1巻きと3巻きで行う。



Fig. 2.9 Experimental setup

2.6.3 実験結果

1巻きではほとんど駆動角が得られなかったため、3巻きの結果のみを述べる。

図 2.10 と図 2.11 は冷却時と加熱時のトルクアクチュエータの写真である。

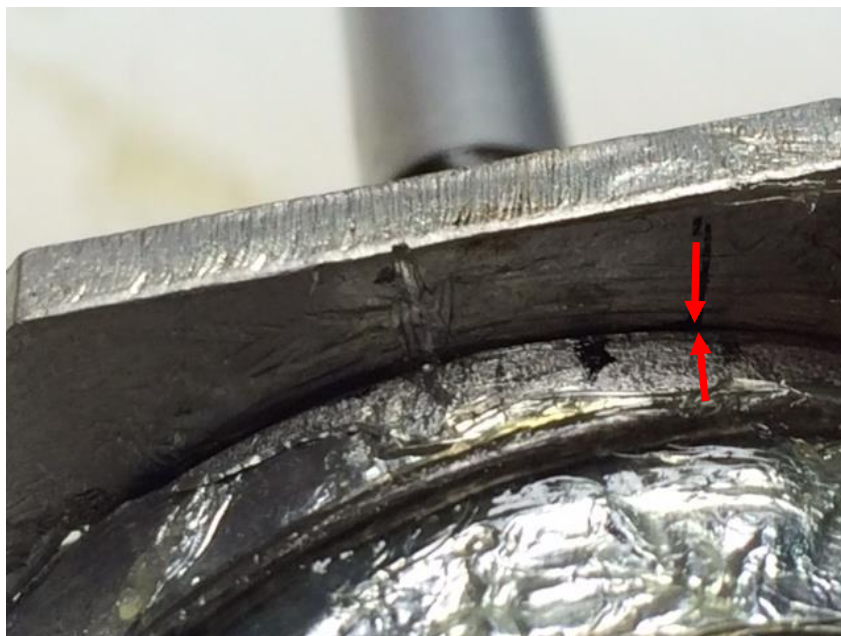


Fig. 2.10 Photograph of the torque actuator at low temperature

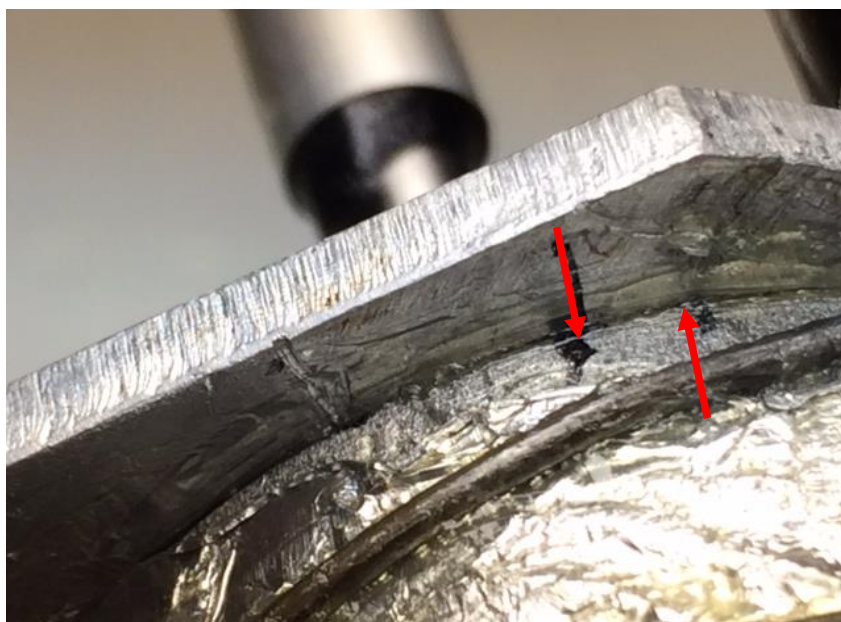


Fig. 2.11 Photograph of the torque actuator at high temperature

図 2.10 と図 2.11 の矢印のように 6[degree]の変位角を得られた。

また静止最大トルクは 310[N・mm]を得られた。

2.7 考察

実験結果は 3 巻きのもので、予備実験の結果から得られる理論値では 10[degree]が得られることになるが、結果は 6[degree]と半分程度になった。この主な原因はコイルと円筒の摩擦と考えられる。その為、変位の増加には円筒を多段化するなどの改良が必要となる。トルクは最大 0.25[Nm]であった。同じ寸法の電動モータ(マブチモータ株式会社 RS-540SH 最大トルク 30.6mN・m)と比較すると 10 倍近くの高いトルクが得られた。コイルの線径を大きくすることでさらに高いトルクを発生することができる。

2.8 結論

コイル状に加工した Ti-Ni 形状記憶合金と、同様にコイル状に加工した Ti-Ni 超弾性合金をバイアスとして組合せ、コイルの線方向の伸びを利用し SMA の高温時と低温時の縦弾性係数の差により駆動する熱駆動型の高性能トルクアクチュエータを開発した。

直線のワイヤを用いた予備実験の結果から理論値では 10[degree]の変位を得られることとなったが、本実験の結果は 3[degree]しか得られなかった。

変位角の増大には、円筒を多段化するなどの改良が必要となる。

トルクは最大 0.25[Nm]であった。同じ寸法の電動モータと比較すると 10 倍近くの高いトルクが得られた。

第3章 TiNi-SMA ねじりばねを用いたトルクアクチュエータ

3.1 研究目的

これまで SMA が実用化されている換気扇の弁の開閉など回転運動が必要となる場合、リニアな運動を回転運動に変換して利用されてきた。しかしこれでは駆動機構が複雑・大型化になってしまう。そこで、本研究では SMA ねじりばねの回転運動を直接利用できる新機構のアクチュエータを開発する。

本研究での設計開発の目的は温度変化だけで駆動する SMA を用いた熱駆動型のトルクアクチュエータの設計開発である。

3.2 Ti-Ni SMA トルクアクチュエータの概要

本研究で設計製作する Ti-Ni 形状記憶合金を用いたトルクアクチュエータの概要を説明する。直接トルクと回転角を発生させることが出来、省スペースで大きなトルクを発生させることが可能なねじりばねに着目し、ねじりばねの機構を利用したトルクアクチュエータを開発する。第2章で述べた線材の伸びを利用したコイル型アクチュエータと比べ、ねじりばねの回転を利用するため、出力トルクは下がるが、摩擦が少なくなるのでより大きな出力角を得られると考えられる。

具体的には、Ti-Ni SMA をねじりばね状に加工し、バイアスとして同様に加工した Ti-Ni 超弾性合金を用いて、高温時と低温時の縦弾性係数の差を利用した熱駆動型のトルクアクチュエータを設計開発する。

本研究では比較対象として、株式会社コガネイのロータリーアクチュエータ ベーンタイプ RAG1-90[19]と比較する。これは空気圧アクチュエータの一種である。表 3.1 に寸法と出力を示す。出力角は定角の 90° であり、出力トルクは使用推奨圧縮空気による圧力 0.5MPa 時で $0.118\text{N}\cdot\text{m}$ となっている。主な使用例は、工業製作機器などの一部などとして回転によりねじやボルトを締めるほか、物体の回転移動などにも使用される。

Table 3.1 Specifications of the existing rotary actuator[19]

Length	43.5mm
Width	50mm
Height	80mm
Output angle	90°
Output torque	$0.118\text{N}\cdot\text{m}$

3.3 SMA トルクアクチュエータの駆動原理

SMA トルクアクチュエータの駆動原理の基本は、第2章の図2.4で述べた原理と同じである。Ti-Ni SMA をバイアスである Ti-Ni 超弾性合金と組み合わせることにより、SMA の高温側で弾性係数が大きく、低温側で弾性係数が小さいという性質を利用して2方向性の作動を得るというものである。今回は、ワイヤの線方向の伸びではなく、ねじりばね型の SMA によりトルクを生み出す。まず、形状記憶合金と超弾性合金をねじりばね状に加工する。お互いのねじりばねは中央に位置する円盤に接続されており、温度変化によりねじりばねが変形し、円盤が回転することにより、円盤とつながれた軸が回転し、出力を得ることが出来る。低温時にねじりばねをばね径が小さくなる方向に回転させて、ねじった状態でバイアス側のねじりばねと組み合わせる(図3.1左側)。それを加熱することで、形状記憶合金側のねじりばねの縦弾性係数が上昇し、ばねとしての力が強まり、元の形状であるばね径が大きくなる方向に回転し、バイアスである超弾性合金側のねじりばねをばね径が小さくなる方向に回転させてねじれさせる(図3.1右側)。もう一度、形状記憶合金側のねじりばねを冷やすと形状記憶合金側のねじりばねの縦弾性係数が低くなり、ばねとしての力が弱まりバイアス側の元のばね径に戻ろうとする力に負けて、形状記憶合金側はばね径が小さくなる方向に回転し、ねじられた状態となる。その際に超弾性側のねじりばねは径が元に戻る方向に回転している。このねじりばねの性質を利用し回転によるトルクと角度を生み出すことが出来る。

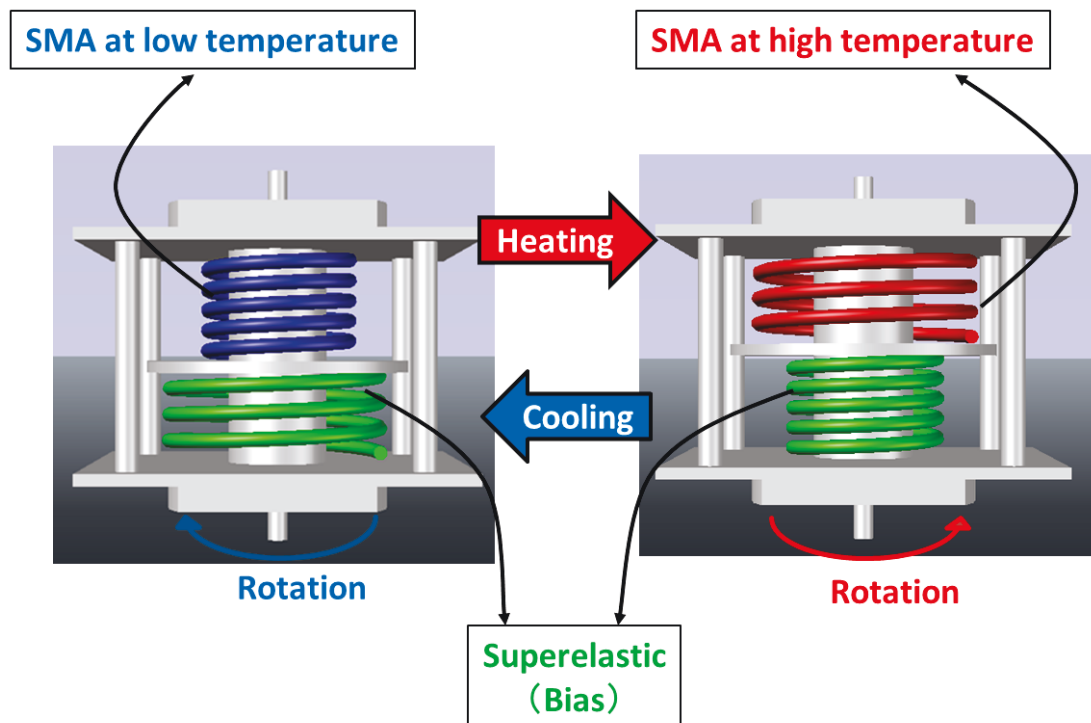


Fig. 3.1 Drive principle of the produced torque actuator

SMA を用いた一般的なばね型アクチュエータは、応力ひずみ線図を用いて図式的に出力を算出する[14]。

図 3.2 のような圧縮コイルばねを考える。図のように右側に SMA ばね、左側にバイアスバネを組み込んであり、前述したトルクアクチュエータと同様に弾性係数の差を利用してリニアな作動変位を得られる。

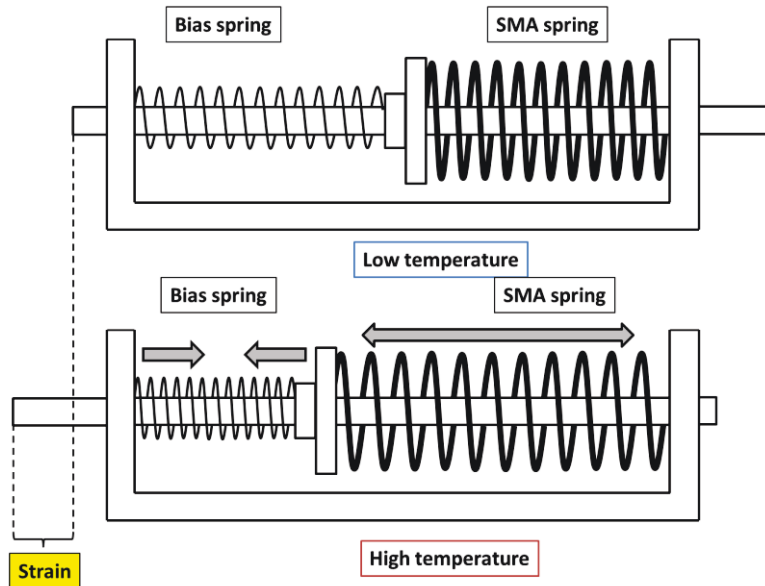


Fig. 3.2 The outline block diagram of the linear actuator

このアクチュエータの出力は図 3.3 のような応力ひずみ線図を用いて算出される。バイアスばねによる負荷直線は図中の黄色の直線のように、形状記憶コイルの直線と反対に傾斜しており、勾配がばね定数に相当する。横軸との交点はバイアス力 0 に対応する。出力ひずみと出力応力は図の左側ようになる。理想変位 A は、摩擦がなく出力荷重 F を 0 とした時の出力ひずみである。

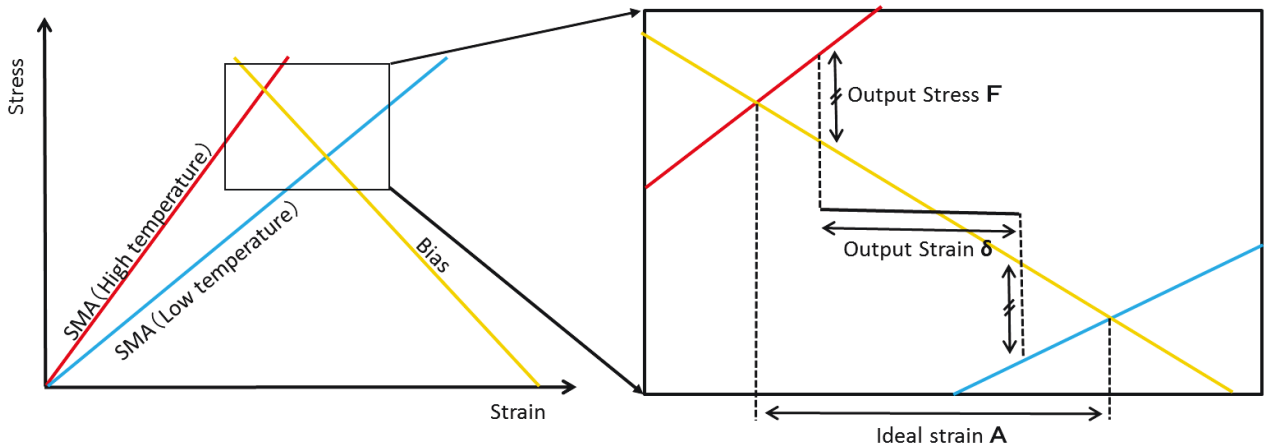


Fig. 3.3 Stress-strain diagram to use for the calculation of the theoretical value

本研究では、これを下記の式 3.1 と 3.2 を用いて、ねじれ角ひずみ曲線に変換して出力を

算出する。

ここでねじりばねのトルクとねじれ角の関係について簡単に説明する。

ねじりばねとは、圧縮・引張コイルばねと違い、コイルの中心軸まわりにねじりモーメント（トルク）を受けるばねであり、回転方向の力を蓄えることができる。ねじりばねの出力トルクと出力角の関係は JIS により規定されており、以下の式のようなになる[20]。

$$\varphi_d = \frac{360DN}{Ed} \cdot \sigma \quad (3.1)$$

$$M = \frac{Ed^4}{64DN} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \varphi_d \quad (3.2)$$

ここで、 M はモーメント[N・mm]、 E は縦弾性係数[N/mm²]、 d はばね径[mm]、 D はコイル径[mm]、 N は有効巻き数、 σ は曲げ応力[N/mm²]、 φ_d はばねのねじれ角[degree]を表す。

3.4 材料特性測定実験

本研究で用いる Ti-Ni SMA ワイヤの材料特性を計測するため引張試験を行う。

3.4.1 試験片

本研究では、市販の株式会社アクトメント製未記憶 Ti-Ni SMA ワイヤ WDL4-12(直径 1.2mm Ni56.06wt%)と株式会社アクトメント製未記憶 Ti-Ni SMA ワイヤ WDL1-21(直径 2.1mm Ni55.4wt%)の 2 種類のワイヤを用いる。この材料は未記憶なので、形状記憶処理を行う。形状記憶処理の条件を表 3.2 に、超弾性処理を表 3.3 に示す。

Table 3.2 Condition of Shape memory treatment

Diameter	Heat treatment temperature	Heat treatment time	Cooling method
1.2mm	560°C	40分	Water cooling
2.1mm	550°C	40分	Water cooling

Table 3.3 Condition of Superelastic treatment

Diameter	Heat treatment temperature	Heat treatment time	Cooling method
1.2mm	410°C	40分	Water cooling
2.1mm	300°C	40分	Water cooling

3.4.2 実験方法

材料特性測定実験に用いる試験片を製作するにあたり、上記の Ti-Ni SMA ワイヤを 80mm に切断し直線状に拘束して電気炉(ヤマト科学 FO610)を用いて表 3.2 と表 3.3 の条件で形状記憶処理及び超弾性処理を行う。熱処理を施した試験片をオートグラフ(島津製作所 AG-IS 250kN)に設置し、軸方向に荷重を負荷し、標点距離観察カメラ(CV-200M、CV-3500)を用いてひずみを計測する。計測データはプログラマブルコントローラ KV5000 とデータ収集アプリケーション KV COM を用いて記録する。以下、3 種類の引張試験を線径 1.2mm と線径 2.1mm で行う。(i) SMA は約 10°Cの低温で荷重を負荷し、ひずみが 4%に達したら除荷する。その後、工業用ドライヤで約 150°Cまで加熱し形状回復することを確認する。また、(ii) 工業用ドライヤで約 150°Cの高温まで過熱した状態で荷重を負荷し、ひずみが 4%に達したら除荷する。(iii) 超弾性合金は約 10°Cの低温で荷重を負荷し、ひずみが 4%に達したら除荷する。それぞれその間の荷重をオーグラフで、ひずみを標点間カメラで計測し、応力ひずみ曲線を作成する。

3.4.3 実験結果

引張試験の結果から作成した応力ひずみ曲線を図 3.4 から図 3.9 に示す。図 3.4 のように、線径 1.2mm 低温時の応力ひずみ曲線では予ひずみ 4%を与えた後、除荷し、加熱を行う

ことでひずみは完全に回復した。

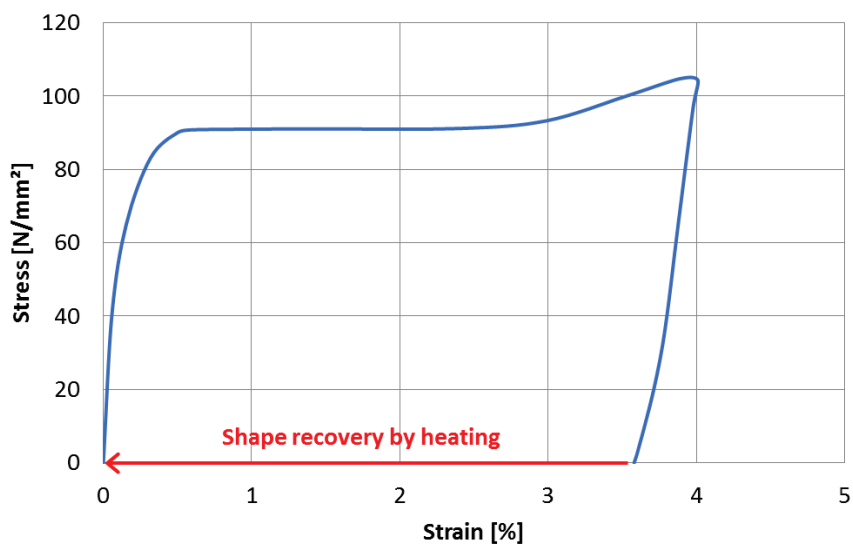


Fig. 3.4 Stress-strain curve of 1.2mm SMA wire at low temperature

図 3.5 のように、線径 1.2mm 高温時の応力ひずみ曲線では予ひずみ 4%を与えた後、除荷するだけでひずみは完全に回復した。

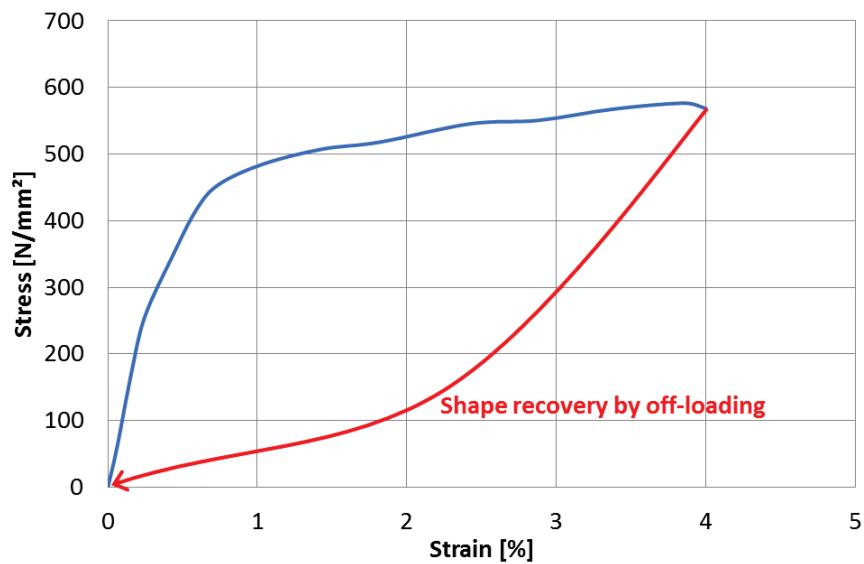


Fig. 3.5 Stress-strain curve of 1.2mm SMA wire at high temperature

図 3.6 のように、線径 1.2mm 超弾性の応力ひずみ曲線では予ひずみ 4%を与えた後、除荷だけでひずみは完全に回復した。

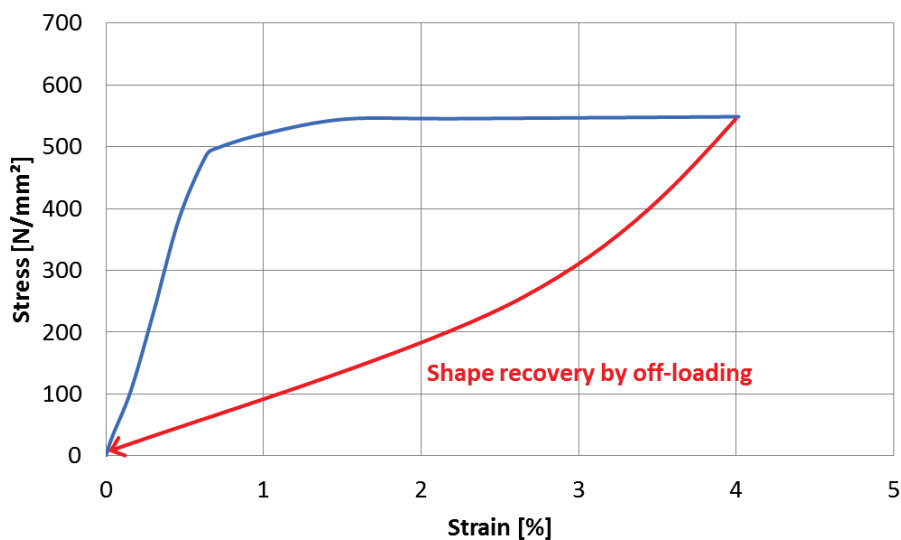


Fig. 3.6 Stress-strain curve of 1.2mm superelastic alloy wire

図 3.7 のように、線径 2.1mm 低温時の応力ひずみ曲線でも、予ひずみ 4%を与えた後、除荷し、加熱を行うことでひずみは完全に回復した。

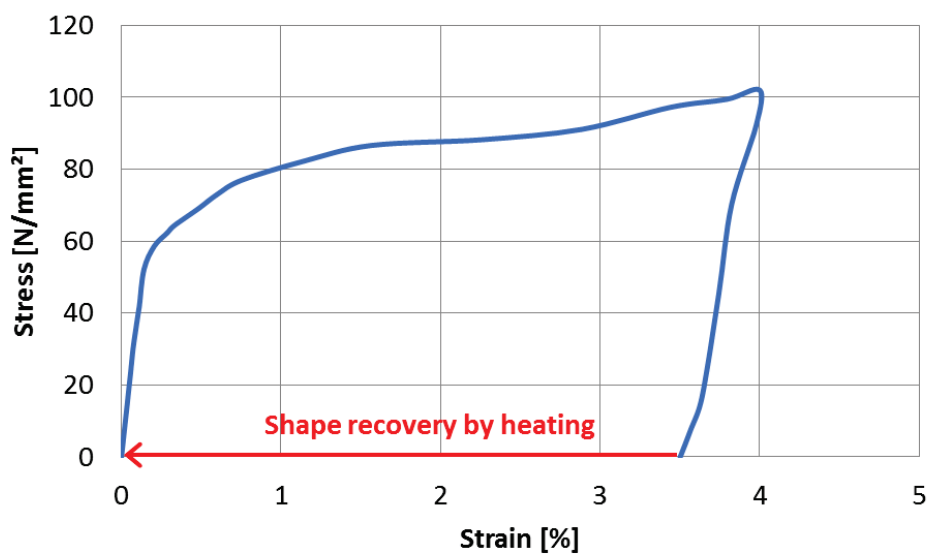


Fig. 3.7 Stress-strain curve of 2.1mm SMA wire at low temperature

図 3.8 のように、線径 2.1mm 高温時の応力ひずみ曲線では予ひずみ 4%を与えた後、除荷するだけでひずみは完全に回復した。

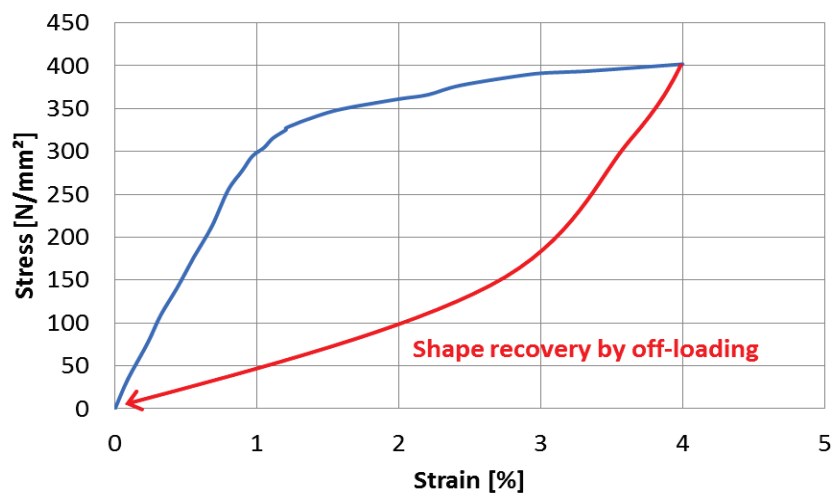


Fig. 3.8 Stress-strain curve of 2.1mm SMA wire at high temperature

図 3.9 のように、線径 2.1mm 超弾性の応力ひずみ曲線では予ひずみ 4%を与えた後、除荷だけでひずみは完全に回復した。

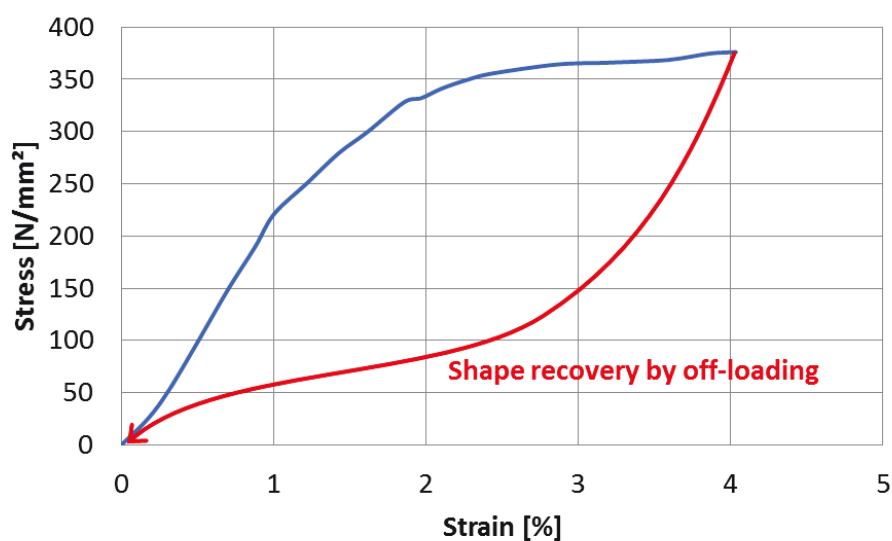


Fig. 3.9 Stress-strain curve of 2.1mm superelastic alloy wire

線径 1.2mm,2.1mmSMA は、共に低温時は除荷後に加熱することで元の形状に回復した。また、高温時は高温を維持したまま除荷していくと元の形状に戻った。超弾性処理を施した合金は除荷するだけで元の形状に戻った。これらの結果を用いて Ti-Ni SMA を用いたトルクアクチュエータの設計を行う。

3.5 SMA トルクアクチュエータ

3.5.1 SMA トルクアクチュエータの設計

本研究で設計製作するトルクアクチュエータは、ねじりばねのトルクのつり合いの変化から出力角と出力トルクを発生させる。使用する式は上記のねじりばねの式を主に使用して理論値を算出する。しかし形状記憶合金は通常の金属とは異なり、線形弾性域を超えて見かけ上の塑性域までの変形を使用するため、一般的に使用される縦弾性係数（E）を使用することが出来ない。そこで、本研究ではトルクアクチュエータを設計するに当たり、以下のように応力ひずみ曲線の微小領域の変化量から仮の縦弾性係数を求めて用いる。

図 3.10 のように、引張試験により得られた応力ひずみ曲線の微小領域の変化量 $\Delta\sigma, \Delta\varepsilon$ を求め、その微小領域での傾き $\Delta\sigma / \Delta\varepsilon$ を仮の縦弾性係数とする。

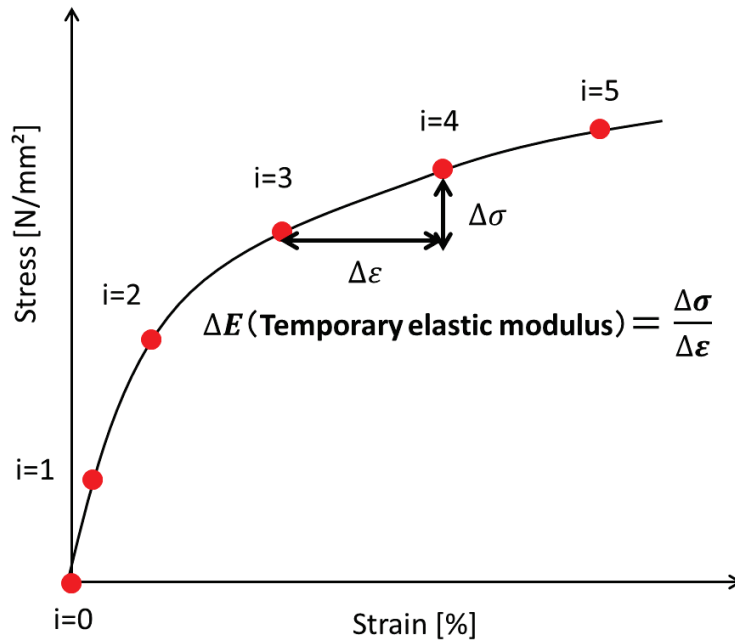


Fig. 3.10 Calculation method of a temporary elastic modulus

仮の弾性係数 ΔE とその時の応力変化量 $\Delta\sigma$ を式 3.1 に代入してねじれ角の変化量 $\Delta\varphi_d$ を求める。

$$\Delta\varphi_d = \frac{360DN}{\Delta E d} \cdot \Delta\sigma \quad (3.3)$$

これを式 3.2 に代入し、トルクの変化量 ΔM を求める。

$$\Delta M = \frac{\Delta E d^4}{64DN} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \Delta\varphi_d \quad (3.4)$$

プロット点 i までのこれらの変化量を足し合わせることで、 φ_{di} と M_i を求める。

$$\varphi_{di} = \sum_{k=0}^i \Delta\varphi_{dk} \quad (3.5)$$

$$M_i = \sum_{k=0}^i \Delta M_k \quad (3.6)$$

これをもとにひずみが 4%になるまでの形状記憶合金ねじりばねのねじれ角トルク曲線を算出する。

本研究で製作したねじりばねのパラメータを表 3.4 に示す。

Table 3.4 Coil parameters

d(Wire diameter)	1.2mm	2.1mm
D(Coil diameter)	16mm	32mm
N(Effective number)	3	3

以上の条件から図 3.3 のようなアクチュエータとしての出力ねじれ角と出力トルクを算出する図に変換したグラフを図 3.11 と図 3.12 に示す。図 3.11 は線径 1.2mm、図 3.12 は線径 2.1mm のグラフである。

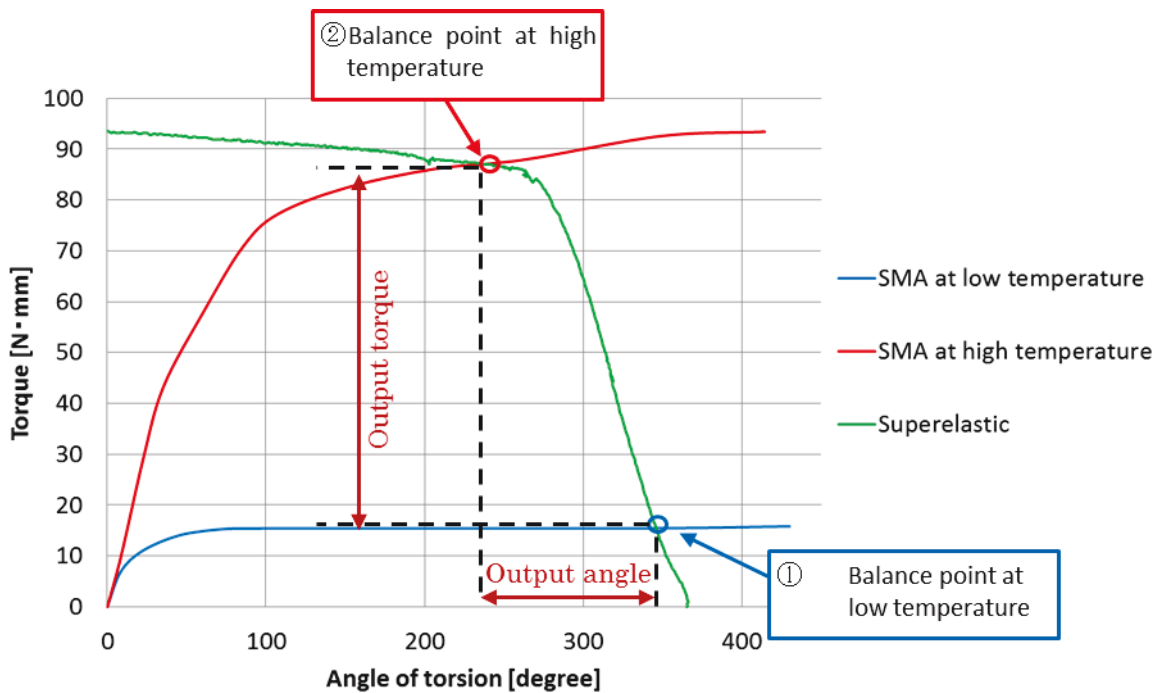


Fig. 3.11 Output torque and output angle of the actuator made of 1.2mm SMA wire

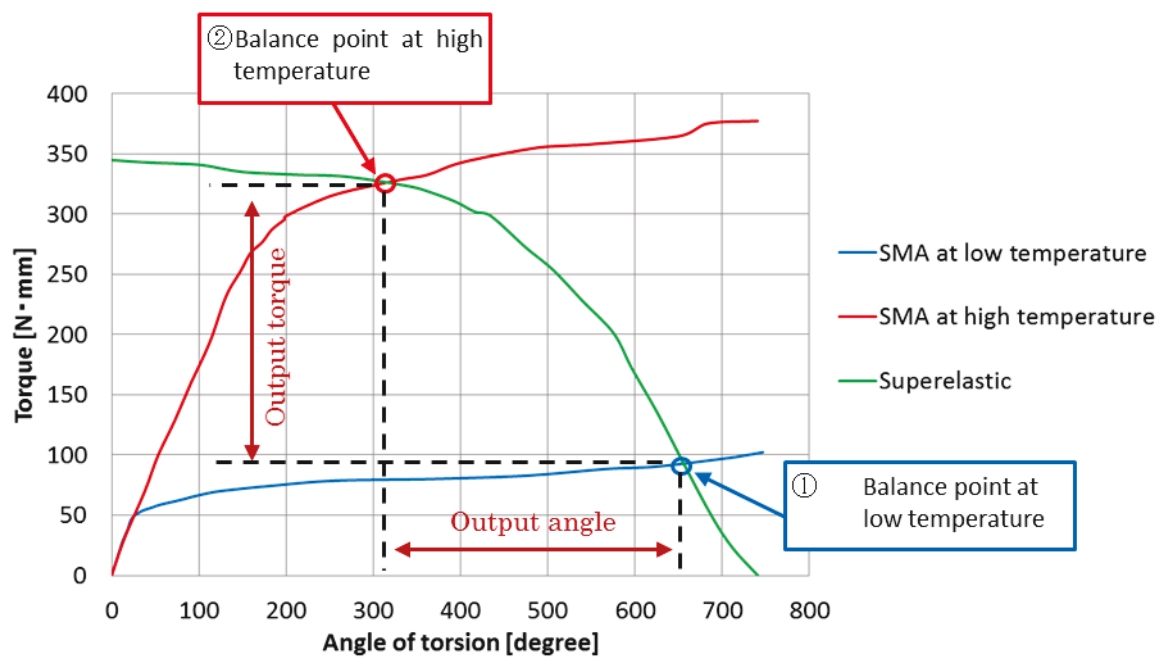


Fig. 3.12 Output torque and output angle of the actuator made of 2.1mm SMA wire

図 3.11 と図 3.12 に示すように①が低温時に SMA と超弾性合金が釣り合っている点で、②が高温時に SMA と超弾性合金が釣り合っている点である。低温時、①の点で釣り合っているが、加熱することにより釣り合いの位置が②に移動し、図のように最大出力トルクと最大出力角が得られる。

以上の方法で得られる最大出力トルクと最大出力角の理論値を表 3.5 に示す。

Table 3.5 Theoretical values of output angle and output torque

Wire diameter, d	1.2mm	2.1mm
Maximum output angle	115°	337°
Maximum output torque	74.1Nmm	237Nmm

3.5.2 製作した SMA トルクアクチュエータ

製作した SMA トルクアクチュエータの写真を図 3.13 と図 3.14 に示す。
また諸寸法と寸法の概略図を表 3.6 と図 3.15 に示す。

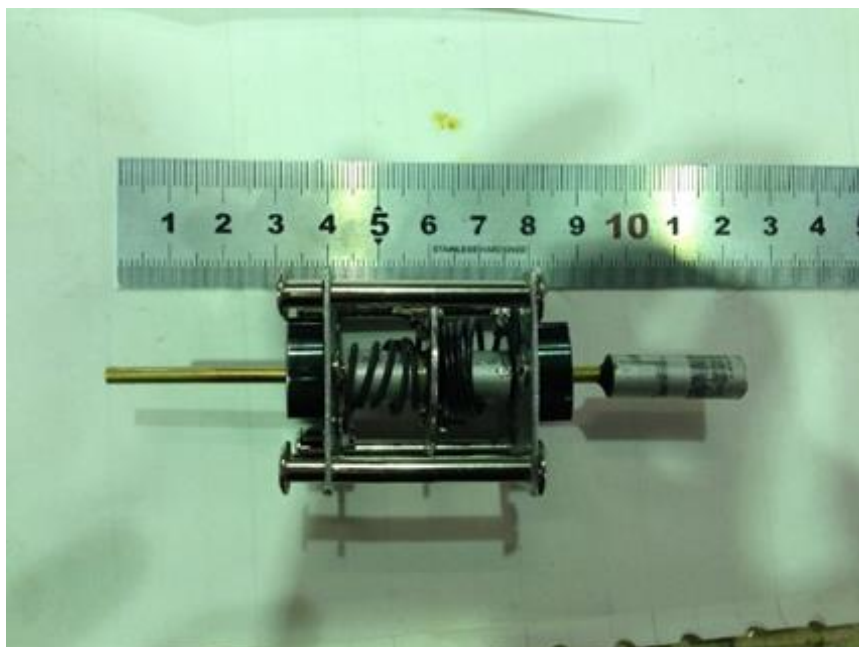


Fig. 3.13 SMA torque actuator made of 1.2 mm SMA wire

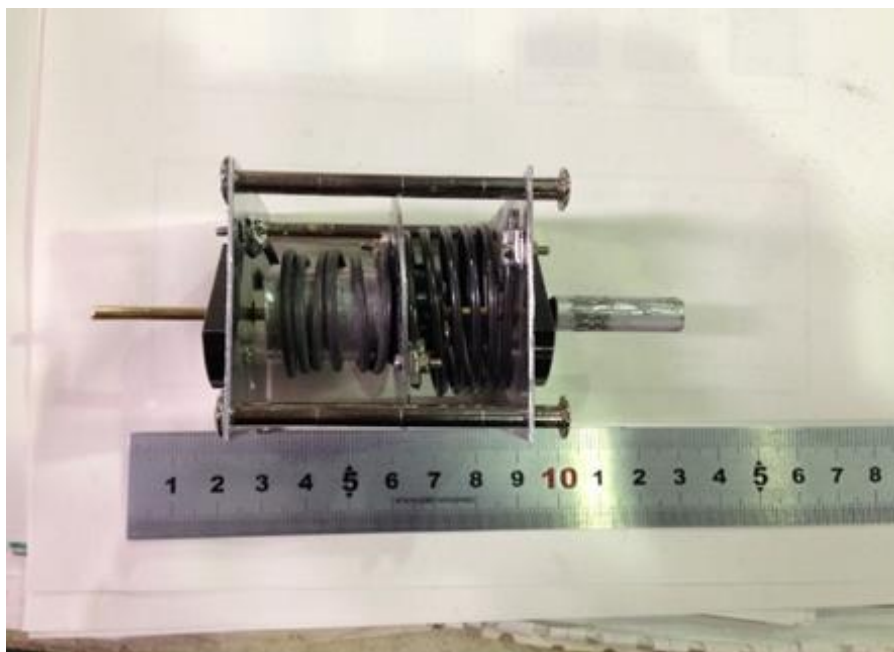


Fig. 3.14 SMA torque actuator made of 2.1 mm SMA wire

Table 3.6 Dimensions of the SMA torque actuators

Wire diameter, d	Vertical length	Horizontal length	Height
1.2mm	35mm	35mm	70mm
2.1mm	60mm	60mm	100mm

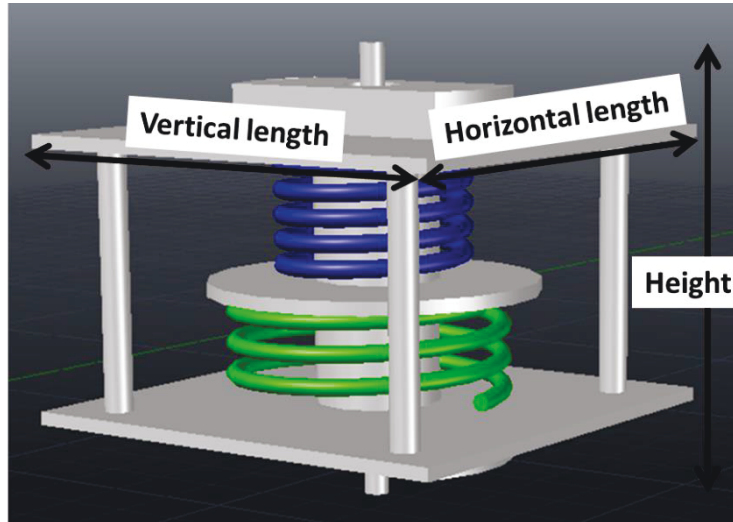


Fig. 3.15 Dimensions notation of the SMA torque actuators

3.6 SMA トルクアクチュエータの駆動実験

製作したトルクアクチュエータの出力トルクと出力角を計測し、理論値との比較を行う。また比較対象であるロータリーアクチュエータ(RAG1-90)と比較し性能評価を行う。

3.6.1 実験方法

出力トルクは図 3.16 のように低温時のトルクアクチュエータとトルクメータを介して接続されたシャフトを固定して、回転角 0[degree]とし工業用ドライヤで加熱した時に発生する静止トルクを計測する。トルクメータは UTM-30Nm(ユニパルス株式会社)を用いる。このトルクメータは発生したトルクをストレインゲージで検出し、電圧で出力する。この時 30Nm で 5V を示す。

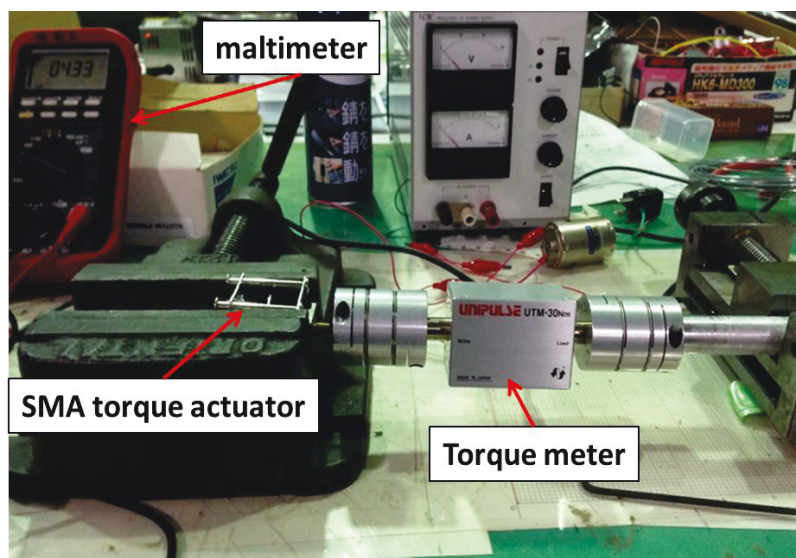


Fig. 3.16 Diagram of the experimental device

出力角は冷水(約 5°C)で冷やしたトルクアクチュエータをお湯(約 80°C)につけて暖め、駆動した角度を計測する。

3.6.2 実験結果

出力トルクの実験結果と理論値を表 3.7 と表 3.8 に示す。

Table 3.7 Experimental results and theoretical values of output torque

Output torque	$d=1.2\text{mm}$	$d=2.1\text{mm}$
Theoretical value	74.1Nmm	237Nmm
1 st	69.0Nmm	238.8Nmm
2 nd	70.2Nmm	244.8Nmm
3 rd	70.8Nmm	239.4Nmm
4 th	72.0Nmm	243.6Nmm
5 th	71.3Nmm	237.6Nmm
6 th	69.6Nmm	234.0Nmm
7 th	70.9Nmm	243.0Nmm
Average	70.5Nmm	240.2Nmm

Table 3.8 Experimental results and theoretical values of output angle

Output angle	$d=1.2\text{mm}$	$d=2.1\text{mm}$
Theoretical value	115°	337°
1 st	50°	180°
2 nd	45°	180°
3 rd	40°	185°
4 th	45°	175°
Average	45°	180°

また既存のロータリーアクチュエータ (RAG1-90) との出力と大きさに関する性能比較を表 3.9 に示す。

Table 3.9 Performance comparison with the existing actuator and the SMA torque actuators

	$d=1.2\text{mm}$	$d=2.1\text{mm}$	RAG1-90
Vertical length	35mm	60mm	43.5mm
Horizontal length	35mm	60mm	50mm
Height	70mm	100mm	80mm
Output torque	70.54Nmm	240.17Nmm	118Nmm
Output angle	45°	180°	90°

3.7 考察

出力トルクに関しては、理論値と実験値でほとんど誤差は見られなかった。出力角に関しては理論値の半分ほどの実験値となった。原因としては出力トルクが理論値通りに出ていることから摩擦や機械損失が大きいことが考えられる。出力角の理論値は出力トルクを0の時なのですべてのエネルギーが出力角を出す移動の力に使われなければならないが、実際にはばね同士の接触や機械同士の接触などにより、摩擦や機械損失が生じてエネルギーロスしてしまう。これらの原因で出力角は理論値より低い値になったと考えられる。既存のアクチュエータとの比較では、線径1.2mmのSMAで製作したSMAアクチュエータは若干小型であるものの出力トルク、出力角共に既存のアクチュエータに及ばなかった。線形2.1mmのSMAで製作したSMAアクチュエータは既存のアクチュエータに対しおよそ二倍の出力トルクと出力角が得られた。サイズは若干大きいものの、既存のアクチュエータは圧縮空気を使用するため、アクチュエータとは別にコンプレッサが必要となる。その点を考慮すると同等の大きさで二倍の出力を得られたと言える。

3.8 結論

熱駆動型の機構自体にセンサ兼アクチュエータとしての働きを見せる形状記憶合金を用いたねじりばね型アクチュエータの設計開発に成功した。

- (1) 線形弾性体ではなく、塑性変形域まで使用する形状記憶合金を用いたねじりばね型トルクアクチュエータの設計式の算出を行った。
- (2) 実験の理論値と出力トルクはほぼ一致したことから導入した計算式は正しいと考えられる。
- (3) トルクアクチュエータに関して温度変化だけで既存のトルクを発生させるアクチュエータと比較して有用であるかを検討した。

同じようにトルクと出力角を出力することが可能な既存のロータリーアクチュエータと比較しても起動時の最大トルクでは既存のアクチュエータ以上の性能を示すことが出来た。また、センサ兼アクチュエータという点でもより簡単な機構でコンパクトなアクチュエータとして使用することが出来ることがわかった。

これまでリニアな駆動を回転方向に変換して実用化されてきた換気扇の開閉などへの応用が期待できる。

第4章 TiNi-SMA を用いた編目型アクチュエータ

4.1 研究目的

これまで Ti-Ni SMA の回復ひずみが 5%程しかないという欠点を解決し大変位を得るための方策として Ti-Ni SMA ワイヤをコイル状に加工するという方策が採られてきた。近年、この方法で Ti-Ni SMA は、電動モータや圧搾空気を用いるアクチュエータの代用としていくつもの実用化に成功した。しかし、コイル状に加工すると出力荷重が著しく低下してしまう。線径を大きくすることで出力荷重は増大する。しかし、線径を大きくすれば形状回復力増大するが、ワイヤ径を大きくすると体積当たりの表面積が小さくなり、温度反応速度が低下してしまう。

近年、Ti-Ni SMA ワイヤを編目状に編むことにより大きな変位が得られるといういくつかの報告がある。編目構造の SMA は SMA ワイヤの曲げによるひずみだけでなく、編目構造特有のすべり変形により大きな変位を発生させることができる。編目構造の SMA は SMA ワイヤの曲げによるひずみだけでなく、編目構造特有のすべり変形により大きな変位を発生させることができる[8] [21]。これまでの形状記憶合金の研究は材料そのものの性能の向上に関する研究が主であり、その知能構造化についての研究はあまり行われていない。知能構造化の観点から言えば、編目型アクチュエータに関する研究は非常に独創的である。本章の研究を実行するにあたり、線径 0.15mm の Ti-Ni SMA ワイヤを用いて手編みの試験片を製作し予備実験を行った。その結果、500%以上の驚くべき出力変位を得られることがわかった。これまでの研究では編み方による出力変位と出力応力の違いはほとんどわかっていない。そこで、本章の研究では、代表的なメリアス編みとガーター編みで試験片を製作し、編み方による機械特性と出力特性の違いを実験により明らかにする。

4.2 編目型アクチュエータの概要

4.2.1 編目について

図 4.1 と図 4.2 にメリアス編みとガーター編みの編目構造の概略図を示す。編目により定義される wale 方向と course 方向は図 4.3 に示すようになる。

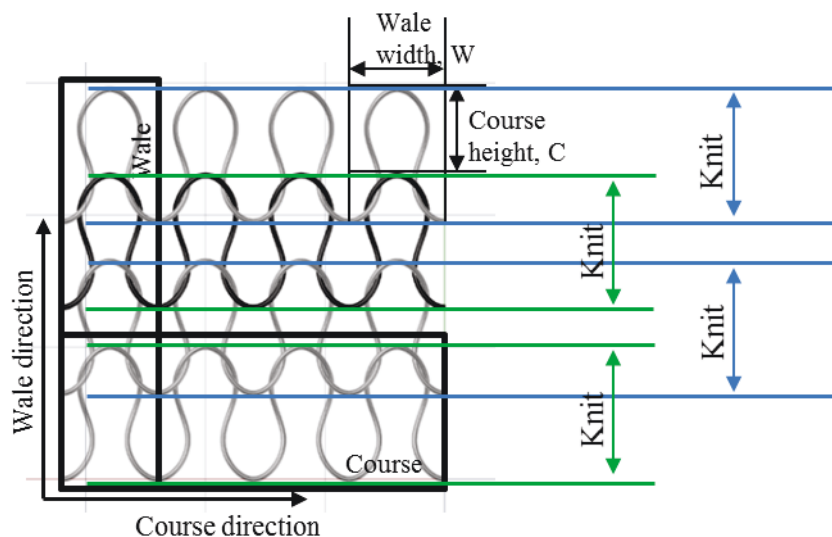


Fig. 4.1 The stockinet stitch.

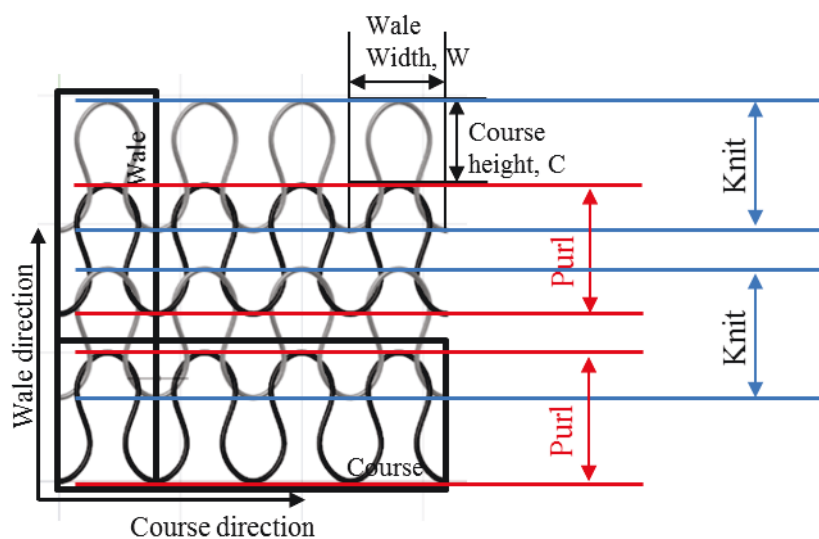


Fig. 4.2 The garter stitch.

一般的な編み物は、切れ目のない連続な一本のワイヤで、図 4.3 に示すような単位格子の繰り返しにより構成される。ひとつの単位格子はひとつの弧型のループとその二つの足によって成り立っている。ループは前の列の単位格子の二つの足と連結され、そのループの足は次の列のループと連結される。編目構造はこの単位格子のループと足が前の列のループと足とどのような位置関係にあるかで区別される。図 4.1 のように、単位格子のループが前

の列の単位格子の足の手前に配置されている編目を **knit** ループと呼ぶ。一方、図 4.2 のように、単位格子のループが前の列の単位格子の足の後方に配置されている編目を **purl** ループと呼ぶ。

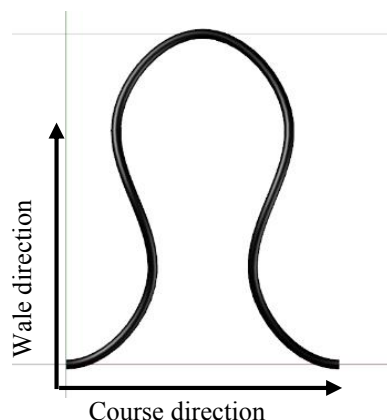


Fig. 4.3 The unit cell in the stitches.

最も一般的なメリアス編みにおいて、単位格子の全てのループは前の列の単位格子の足の手前に配置されている。つまり、メリアス編みは **knit** ループの繰り返しにより構成される。一般的に高伸縮性を持つとされるガーター編みは、**knit** ループと **purl** ループの交互の繰り返しにより構成される。本研究では、wale 方向の単位格子の数を m 、course 方向の単位格子の数を n と定義する。

4.2.2 線径 0.15mmTi-Ni SMA ワイヤを用いた予備実験

本章の研究を実行するにあたり、線径 0.15mm の Ti-Ni SMA ワイヤ用いて手編みの試験片を製作し予備実験を行った。試験片の拡大写真と概略図を図 4.4 に示す。

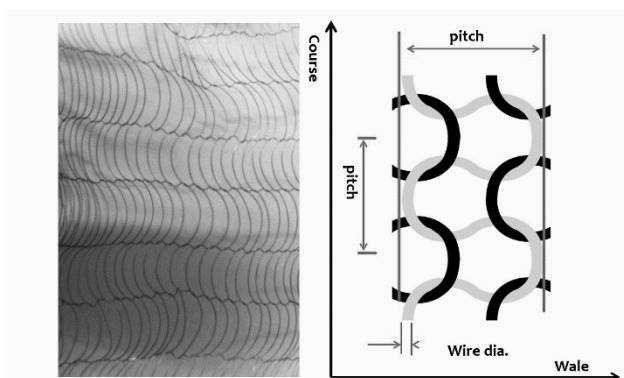


Fig. 4.4 The knitting specimen with 0.15 mm wire.

直線状に形状記憶された Ti-Ni SMA ワイヤを用いてガーター編み試験片を製作した。図 4.5 は常温で 630%まで引き伸ばしたガーター編み試験片である。変態温度まで加熱することで初期形状まで完全に形状回復した。

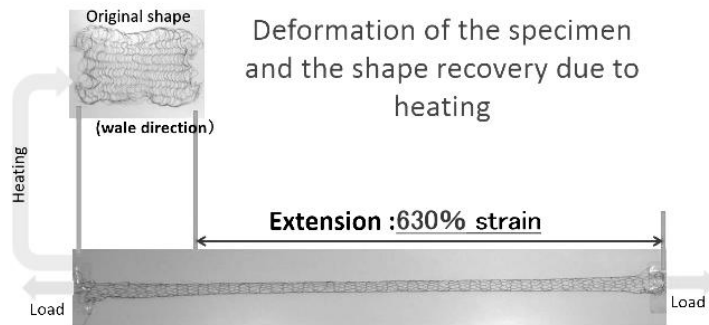


Fig. 4.5 Deformation of the Garter stitch specimen and the shape recovery due to heating. The TiNi wire with diameter of 0.15 mm are shape memorized in a shape of line and knitted as shown in Figure-3.

線径 0.15mm の Ti-Ni SMA ワイヤで作られた編目型試験片の形状回復メカニズムを図

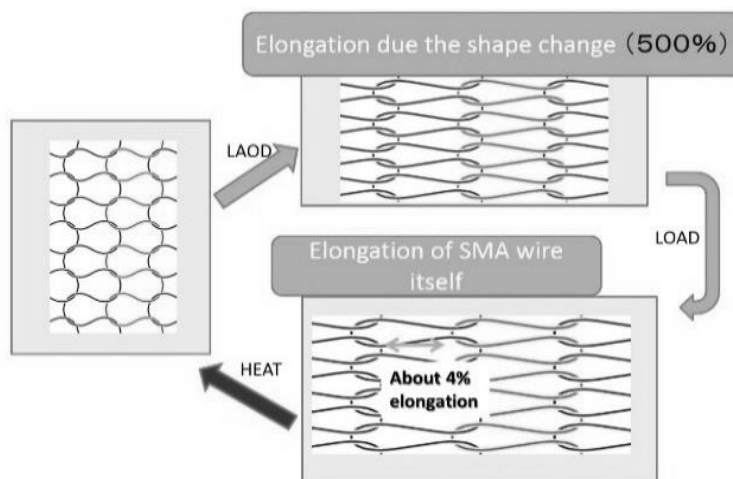


Fig. 4.6 Mechanism of the Shape recovery of the knitting specimen made by a TiNi wire with diameter of 0.15 mm. The wire was shape memorized in a shape of line.

4.6 に示す。試験片が荷重を受けた時、単位格子の形状を変えることにより 500%以上の伸びが発生する。さらに荷重を加えることにより、Ti-Ni SMA ワイヤの結晶構造の変化により試験片の伸びが発生する。これを加熱することにより、Ti-Ni SMA が母相に戻り、単位格子が初期形状に回復する。

4.3 編目型試料の材料特性測定実験

一軸引張試験を行い、Ti-Ni SMA 編目型試験片の機械特性を明らかにする。

4.3.1 Ti-Ni SMA 編目型試験片

本章の研究では、市販の株式会社アクトメント製未記憶 Ti-Ni 形状記憶合金ワイヤ WDM-0.3 (長さ 5m、直径 0.3mm、Ni55.4wt%) を用いる。この材料は未記憶のため、形状記憶処理が必要である。形状記憶処理は熱処理温度 400°C、熱処理時間 40 分、空冷で形状記憶処理を行う。図 4.7 に室温(15°C)での一軸引張試験より得られた応力ひずみ曲線を示す。

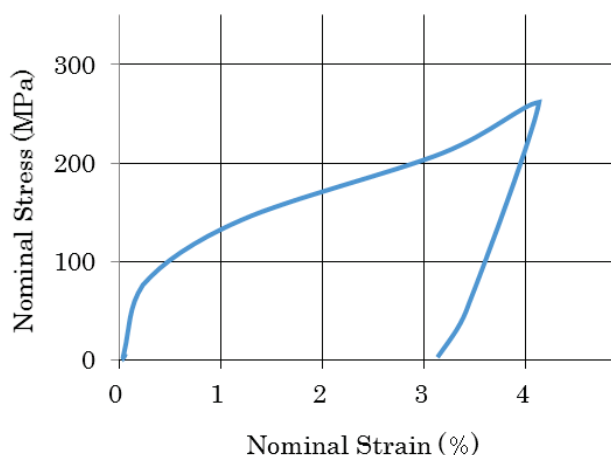


Fig. 4.7. Stress-strain curve of the TiNi SMA wire used for specimens. The wire returns to original shape by heating

リリアン編み機という編み機で 5m の Ti-Ni SMA ワイヤを使用しメリアス輪編みとガーター輪編みの 2 種類の試験片を製作した。図 4.8 にそれぞれの試験片の写真と編目構造の概略図を示す。

この材料は未記憶のため、ワイヤを輪編み状に編みこんだ後、wale 方向に圧縮すると共に course 方向つまり直径方向に引き伸ばし形状に拘束し、上記の形状記憶処理を行った。表 4.1 に編目試験片の諸寸法を示す。

Table 4.1 Dimension of the actuator specimens.

	d (mm)	N_c	N_w	D_o (mm)	L_{wo} (mm)	L_{co} (mm)	C_o (mm)	W_o (mm)
Stockinet knitting	0.3	6	15	30	30	94	2.0	15.7
Garter knitting	0.3	6	15	31	27	97	1.8	16.2

ここで、 d は線径を、 D_0 と L_{w0} は初期形状の円柱直径と標点間距離(有効高さ)をそれぞれ表している。平均 course 高さ C_0 は標点間距離 L_{w0} をその間の wale 数 N_w で割ったもので

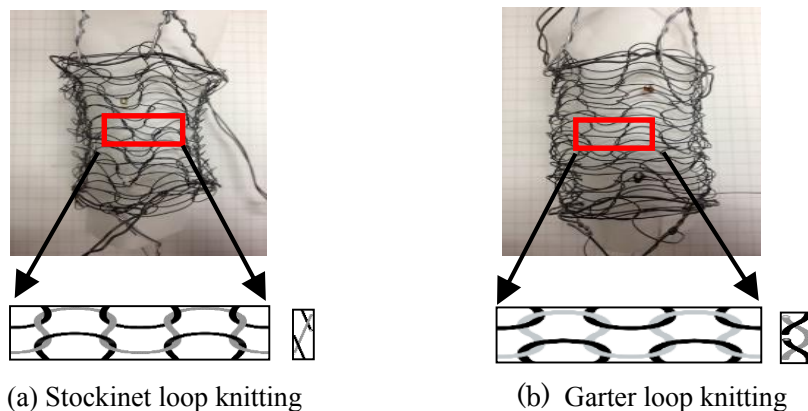


Fig. 4.8 Pictures and schematic drawings of the actuators

ある。同様に、平均 wale 幅 W_0 は円柱の周長 L_{c0} を一周の course 数 N_c で割ったものである。

4.3.2 実験方法

機械特性を明らかにするため、オートグラフ IS-10T を用いて一軸引張試験を行う。まず、オートグラフに試験片を取り付け、指定の荷重が発生するまで軸方向に 3.0mm/min で引張り、その後荷重がなくなるまで戻す。そして形状回復を行うため、工業用ドライヤで変態終了温度まで加熱し、形状回復応力が発生するので再び除荷する。この間、荷重と変位を毎秒 5 回測定する。指定荷重 0.2kgf から 0.1kgf 間隔で 0.6kgf までの 5 サイクル行う。図 4.9 に

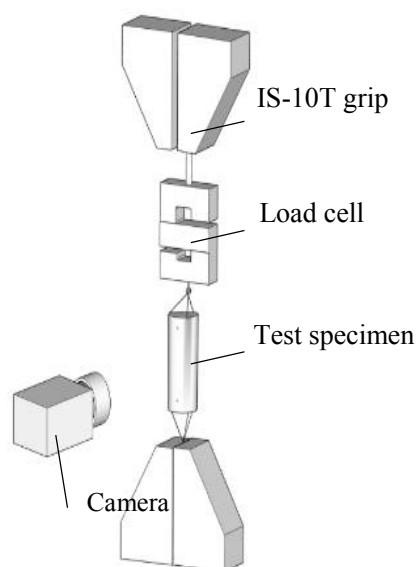


Fig. 4.9 Schematic drawing showing the experimental setup.

実験装置の概略図を示す。荷重は定格容量 50N のロードセル LC1205-K050 で計測する。変位は標点距離観測カメラ CV-200M と CV-3500 を用いて計測し、KV-5000 と KV-COM を用いてデータを記録する。

4.3.3 実験結果

引張試験により得られた結果を真応力ひずみ曲線にしたものが図 4.10 と図 4.11 である。

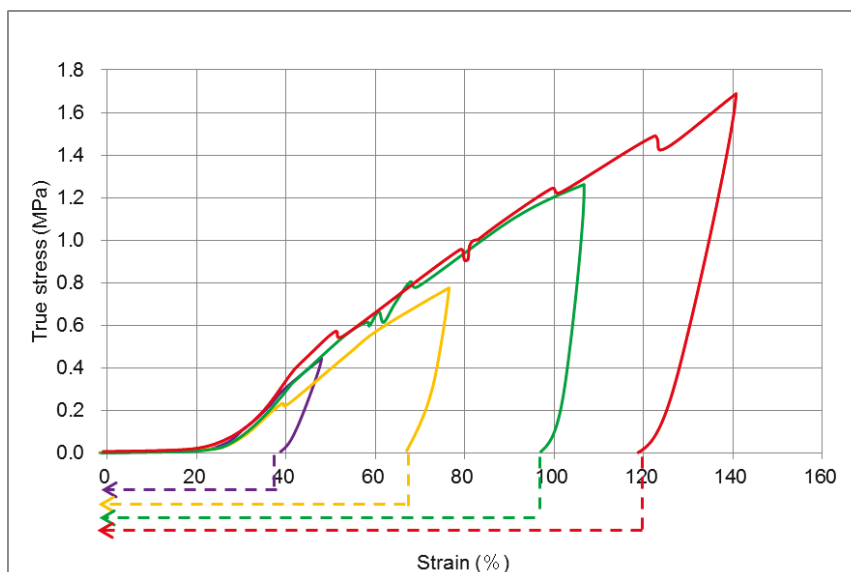


Fig. 4.10 The true stress-strain curve of stockinet loop knitting specimen

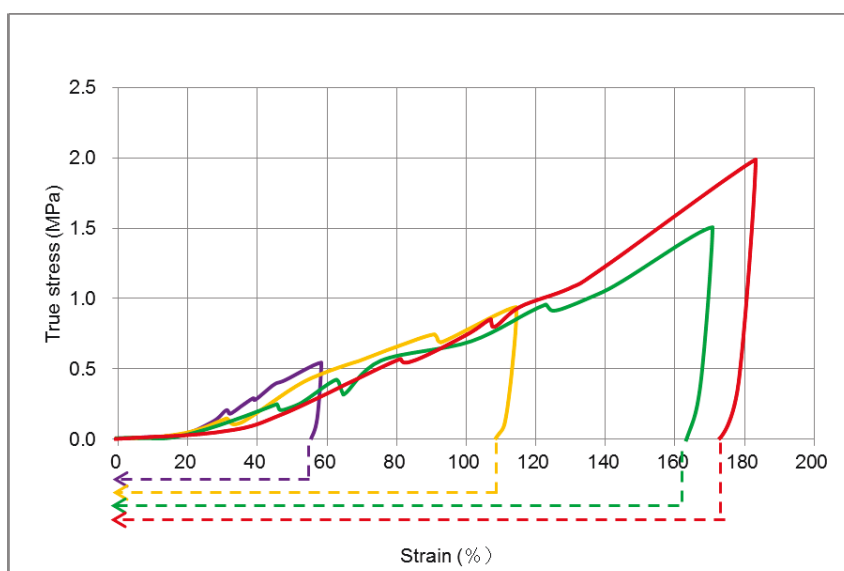


Fig. 4.11 The true stress-strain curve of garter loop knitting specimen

メリアス輪編み、ガーター輪編みともに 0.5kgf の荷重をかけ 100%以上のひずみが発生したが、元の形状まで回復した。0.6kgf をかけた時ガーター編みで標点距離観測用カメラ

の計測限界距離を超えてしまったため、結果は **0.5kgf** までとする。応力を算出する際に断面積が必要となる。断面積は、アクチュエータを作る際に使用した形状記憶合金ワイヤの標点間の体積を標点間距離で割った平均断面積を使用した。加熱時の平均断面積は **6.23mm²** である。

図 4.10 のように、メリアス編みにおいて、1 サイクル目(指定荷重 **0.2kgf**)は 48%のひずみが発生し、約 100 度まで加熱することにより形状回復した。2 サイクル目(指定荷重 **0.3kgf**)は 76%のひずみが発生し、加熱することにより形状回復した。3 サイクル目(指定荷重 **0.4kgf**)は 107%のひずみが発生し、加熱することにより形状回復した。4 サイクル目(指定荷重 **0.5kgf**)は 141%のひずみが発生し、加熱することにより形状回復した。

図 4.11 のように、ガーター編みでは、1 サイクル目(指定荷重 **0.2kgf**)は 58%のひずみが発生し、約 100 度まで加熱することにより形状回復した。2 サイクル目(指定荷重 **0.3kgf**)は 112%のひずみが発生し、加熱することにより形状回復した。3 サイクル目(指定荷重 **0.4kgf**)は 170%のひずみが発生し、加熱することにより形状回復した。4 サイクル目(指定荷重 **0.5kgf**)は 182%のひずみが発生し、加熱することにより形状回復した。

4.3.4 考察

0.5kgf までではいずれも 100%の形状回復率を記録した。通常の形状記憶合金ワイヤでは形状回復率は 5%ほどなので数十倍の形状回復率の増大となった。これは編目構造特有のすべりによる変形が起きたためと考えられる。図 4.12 にすべり変形の様子を模式的に示す。図 4.12 の赤い点が初期形状のワイヤ接点を示しており、荷重負荷後には形状変化によりすべりにより接点が移動していることがわかる。メリアス輪編みでは 116%、ガーター編みでは 173%の形状回復率であった。同じ荷重をかけた場合でも編み方によりひずみ・形状回復率が違うことがわかる。これはメリアス編みとガーター編みで厚みに違いがあるためだと考えられる。ガーター編みは図 4.1・図 4.2 のようにメリアス編みと厚みに違いがあり、メリアス編みより厚み方向の形状変形が大きくなる。このためガーター編みの方がひずみが大きくなったと考えられる。メリアス輪編み、ガーター輪編みともに通常の形状記憶合金とは違いひずみが小さい段階では荷重がほとんど発生しなかった。このことから、始めはひずみの発生が形状記憶合金ワイヤ自体のひずみではなくすべりから発生していることが考えられる。また荷重をかけていく過程で急な応力の減少が起こった。これはその地点においてすべりが大きく進行していることが原因と考えられる。0.5kgf までではいずれも 100%の形状回復率を記録した。メリアス輪編みでは 116%、ガーター編みでは 173%の形状回復率であった。編み方により形状回復率が違うことがわかる。今回は測定機器の制約上 0.5kgf の力までしか測れなかったが、これ以上のひずみを発生させても完全に形状回復できる可能性がある。

次節で行う出力測定実験では、どちらの試験片も永久ひずみが残らないとわかった 0.5kgf の荷重で予ひずみを与えることとする。

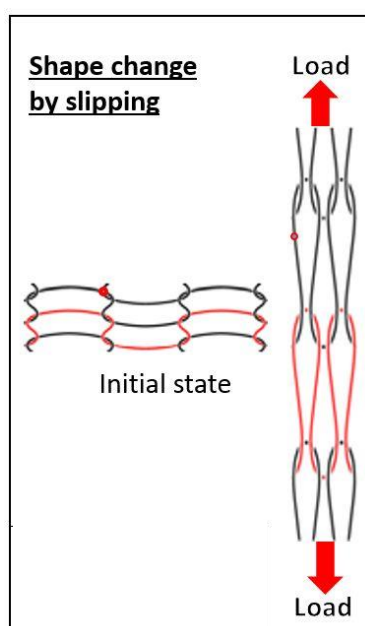


Fig. 4.12 The mechanism of the huge elongation due to the loop shape change by slipping

4.4 出力測定実験

4.4.1 実験方法

まず試験片軸方向に重りにより 0.5kgf の荷重をかけ予ひずみを与える。その後除荷し各荷重をかけ、試験片の $N_w=15$ の位置にマークした標点間距離を測定する。次に試験片を工業用ドライヤで変態終了温度まで加熱すると形状回復効果によりひずみが回復するので、その時の標点間距離を測定する。この一連のサイクルを 5 回繰り返して平均値を算出する。加熱時にかける荷重は、 0kgf , 0.05kgf , 0.10kgf , 0.20kgf , 0.30kgf , 0.40kgf , 0.50kgf をそれぞれ負荷する。

4.4.2 実験結果

実験結果より得られた出力特性を図 4.13 に示す。図 4.13 は縦軸に出力応力、横軸に出力ひずみを示している。つまり、グラフの右上に行くほど出力ひずみと出力応力が大きく、アクチュエータとしての性能が高いことを示す。回復ひずみは加熱時の標点間距離を 0% とし算出した。応力を算出する際に断面積が必要となる。断面積は、アクチュエータを作る際に使用した形状記憶合金ワイヤの標点間の体積を各荷重時の加熱時標点間距離で割った平均断面積を使用した。

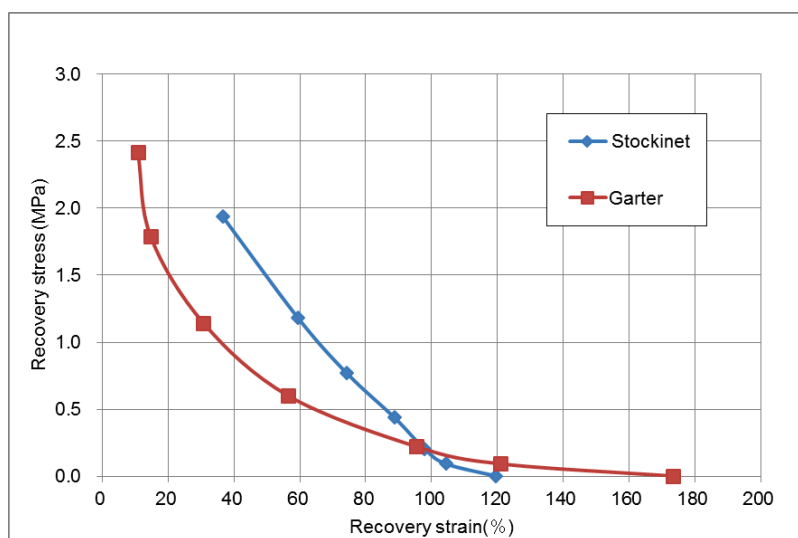


Fig. 4.13 Output performance of the actuator specimens

4.5 考察

最大仕事量メリアスで $0.14\text{N}\cdot\text{m}$ 、ガーターで $0.07\text{N}\cdot\text{m}$ を得ることができた。また発生応力・変位ともに人間の筋肉 $0.4\text{MPa}\cdot 40\%$ [8] を大きく上回る結果となった。

図 4.13 よりメリアス輪編みは応力の大きい領域でガーター編みより大きな変位を得られることがわかる。一方、出力特性の曲線は交差し、応力の小さい領域ではガーター輪編みの方が大きな変位を得られる結果となった。編み方により特性が異なることがわかった。アクチュエータを設計する際は使用目的によって適切な編み方を選択する必要がある。

4.6 結論

最大変位 5%ほどの Ti-Ni 形状記憶合金を用いてメリアス輪編み・ガーター輪編みの 2 種類のアクチュエータを製作し、メリアス輪編みで最大形状回復率 119%、最大仕事量 0.14N/m、ガーター編みで最大形状回復率 173%、最大仕事量 0.07N·m の形状回復率を得られた。

編み方により出力特性が変わることがわかった。本研究では、編み方を変えた 2 種類のアクチュエータを製作したが、線径・ピッチ・目数を変えることにより様々な設計ができる。今後の課題としては、目的に合わせた設計を行うために挙動のモデル化を行う必要がある。

人口筋肉のひとつとしてロボットの動力システムや、駆動音がしないという特徴を活かして高齢者の運動補助などへの応用が期待できる[8]。また、筒状のアクチュエータに独立した複数の加熱装置を装着し制御することにより、ミミズ型ロボットを製作することも可能になる。これは筒状ロボットの直径を変えることができる。形状変化のみで移動が可能となり、災害現場などの複雑な地形の中にも侵入することができ、生存者の発見などに活用できる。また体温に近い変態温度なので、このミミズ型ロボットをナノサイズで作ることで、血管に侵入し目的の血管まで自律的に進行し細くなった血管の拡張を行い、動脈狭窄症の治療を行う等、医療分野への応用は広く想定される。

第5章 TiNi-SMA を用いた皿ばね型アクチュエータ

5.1 研究目的

これまで、超弾性合金を用いた皿ばねの研究開発は行われている[22]が、SMA として駆動する皿ばねの研究は行われていない。本研究では、製作した皿ばね型 SMA の静的な力学特性を実験により調査する。また、製作した皿ばねの有限要素法解析を行い、実験結果との比較によりその妥当性を検証すると共に、 ht （皿ばねの有効高さ/板厚）と出力特性の関係について調べることで性能評価を行う。

5.2 皿ばねの概要

5.2.1 皿ばねとは

皿ばねとは、中心に穴の開いた円盤状の板を円錐状にし、底のない皿のような形状にしたばねの事である。皿ばねは他のばねに比べると、次の様な特長がある[23]。

- ・ 小さなスペースで大きな荷重が得られる。
- ・ 荷重/たわみの関係は、非線形で種々の特性が得られる。
- ・ 重ね方によって、ばね特性を変える事ができる。
- ・ 許容応力範囲内で使用すれば、長く使用に耐えられる。
- ・ 材質選択で耐熱性、耐食性を付加できる。

中でも最も象徴的な特性はコンパクトで大きな荷重が得られ、荷重特性の自由度が大きい事である。例として、圧縮コイルばねとのコンパクト差を比較する。同じ荷重 4400N、同じたわみ 7.2mm のばね性能を考えた時、図 5.1 に示すように、皿ばねは圧縮コイルばねと比べて 25%の体積比で設計することが可能である[24]。

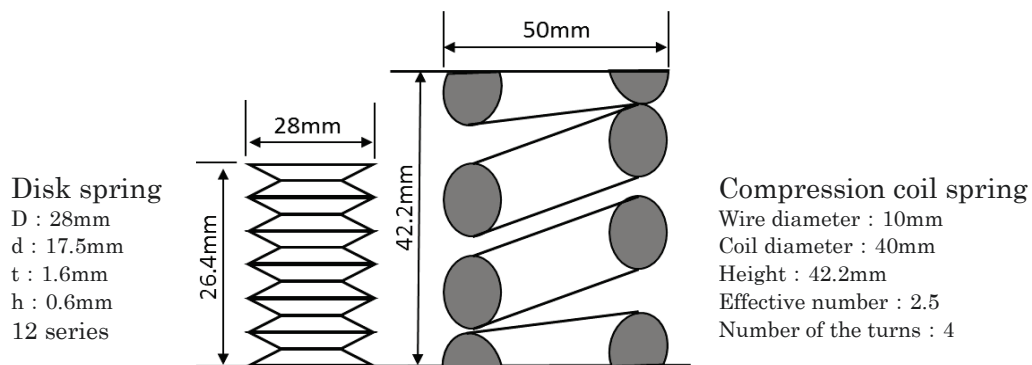
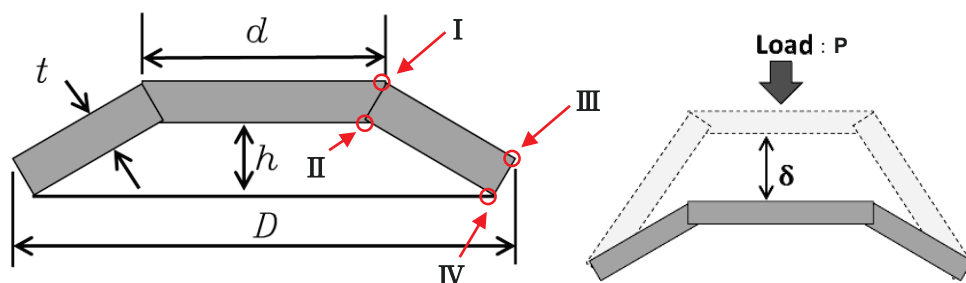


Fig. 5.1 Comparison between disc spring and compression coil spring[24]

5.2.2 皿ばねの計算

図 5.2 に断面形状を用いて設計に必要な諸寸法を示す。



D : Diameter outside, d : Diameter inside, t : Plate thickness, h : Effective height, t
 δ : Deflection

Fig. 5.2 Dimensions of disc spring

皿ばねの荷重 P とたわみ δ の関係を表す計算式として、円周変化による応力と曲面の曲率変化による応力に伴う内部モーメントと外力による外部モーメントの釣り合いを考慮することにより導出されるアルメン-ラスロの近似式が代表的である[23]。数式に用いる記号を表 5.1 に示す。

Table 5.1 .Sign and meaning

Sign	Meaning	Unit
D	Diameter of outside	mm
d	Diameter of inside	mm
h	Plate thickness	mm
H	Effective height	mm
E	Elastic modulus	N/mm ²
ν	Poisson's ratio	
P	Load	N
δ	Deflection	mm
σ_I	Stress at I	N/mm ²
σ_{II}	Stress at II	N/mm ²
σ_{III}	Stress at III	N/mm ²
σ_{IV}	Stress at IV	N/mm ²
C	Distance from axis of symmetry when circumference is unchangeable	mm

アルメンーラスロの計算式は次のような仮定のもとに誘導されている。

(1)軸対称問題として扱う(図 5.3 の A-A'が対称軸)。したがって偏荷重が作用するような場合は扱えない。

(2)図 5.3 の点 O を中心に断面は形状を変えずに剛体回転する。

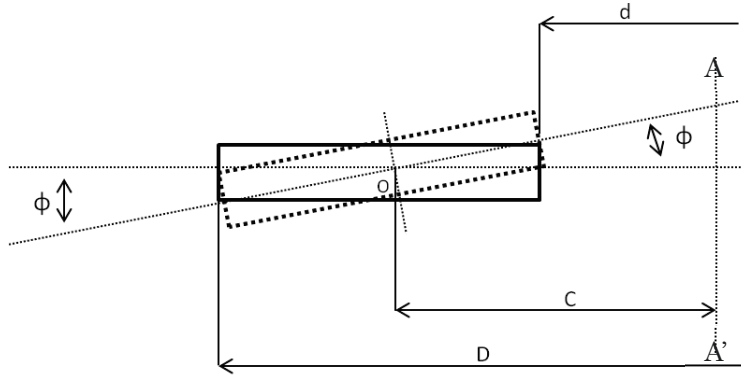


Fig. 5.3 Deformation mode

仮定(2)より、円周の長さは点 O を通る $2\pi C$ は不変で、それより内径側は、角度変化 ϕ によって円周が短く、逆に外径側では長くなる。この様な円周変化による応力と、曲面の曲率変化に伴う応力が、点 O 周りに生じる 1 次モーメントを、外力によるモーメントと等値することにより次の諸式を得る。

荷重-たわみ関係式

$$P = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h^3}{C_1 D^2} \delta \left[\left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{h} \right) \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) + 1 \right] \quad (5.1)$$

上記、荷重(P)-たわみ(δ)関係式は 3 次式であるから、接線ばね定数は δ に関する 2 次式になり、次式で与えられる。

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h^3}{C_1 D^2} \left[\left(\frac{H}{h} \right)^2 - 3 \frac{H}{h} \frac{\delta}{h} + \frac{3}{2} \left(\frac{\delta}{h} \right)^2 + 1 \right] \quad (5.2)$$

図 5.2 に赤丸で示す位置 I, II, III および IV の四隅での応力は次のように与えられる。なお主方向は横断面図 5.2 に垂直な円周方向である。

$$\sigma_I = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h}{C_1 D^2} \delta \left[-C_2 \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) - C_3 \right] \quad (5.3)$$

$$\sigma_{II} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h}{C_1 D^2} \delta \left[-C_2 \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) + C_3 \right] \quad (5.4)$$

$$\sigma_{III} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h}{\alpha C_1 D^2} \delta \left[(2C_3 - C_2) \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) + C_3 \right] \quad (5.5)$$

$$\sigma_{IV} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h}{\alpha C_1 D^2} \delta \left[(2C_3 - C_2) \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) - C_3 \right] \quad (5.6)$$

ここに用いた係数は、次のとおりである。

$$C_1 = \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)^2}{\frac{\alpha+1}{\alpha-1} - \frac{2}{\ln \alpha}} \quad (5.7)$$

$$C_2 = \frac{1}{\pi} \frac{6}{\ln \alpha} \left(\frac{\alpha-1}{\ln \alpha} - 1 \right) \quad (5.8)$$

$$C_3 = \frac{3}{\pi} \frac{\alpha-1}{\ln \alpha} \quad (5.9)$$

ただし

$$\alpha = \frac{D}{d} \quad (5.10)$$

また円周が不変な点 O の座標は

$$C = \frac{\alpha-1}{\ln \alpha} \left(\frac{d}{2} \right) \quad (5.11)$$

で与えられる。[23]

コイルばねの荷重たわみ曲線は一般に直線であるが、皿ばねにおいて、荷重 p はたわみ δ の三次式であり、ばねの有効高さ h と板厚 t の比を変えることにより、荷重たわみ曲線が変化し様々な特性を得ることができる。図 5.4 にたわみ比による荷重特性の違いを示す。ここで、 δ は荷重負荷時の皿ばねのたわみ、 H は皿ばねの有効高さ、 P は皿ばねにかかる荷重、 $P(\delta=H)$ は皿ばねが圧縮によりたわみきった状態での荷重を示す。 $h/t=0.4$ の時、荷重に対しほぼ一定の割合でたわみが増加する。つまり荷重たわみ曲線は直線となる。 $h/t < 1.4$ の場合は完全にたわみきるまで荷重たわみ曲線に極大点は現れないが、 $h/t > 1.4$ の場合、たわみきる前に

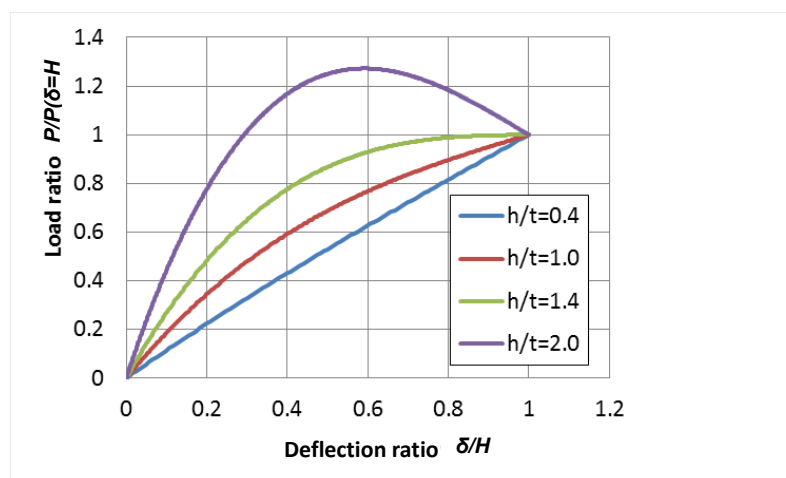


Fig. 5.4 Difference in load properties by the deflection ratio

極大点を向かえそれ以降は急激にたわみが増加する飛び移りといわれる現象が起こる。

また、図 5.5 に示すように、コイルばねと同様に皿ばねも重ね方・組み合わせ方を変えることにより荷重特性を変えることができる。皿ばねを同じ向きに重ねることを並列と呼び、ばねの重ね合わせ枚数 n に反比例し同じ荷重をかけた場合でもたわみは $1/n$ 倍に小さくなる。一方、皿ばねを上下逆さに重ね合わせることを直列と呼び、ばねの重ね合わせ数 n に比例してたわみは n 倍に大きくなる[23]。

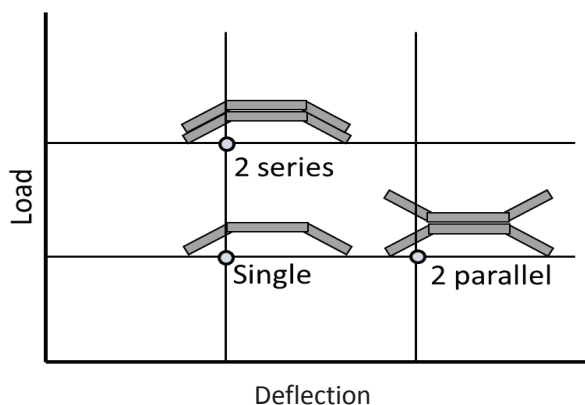


Fig. 5.5 Characterization of Series and Parallel

5.3 SMA 皿ばね

5.3.1 Ti-Ni SMA 材料

本研究で製造する Ti-Ni SMA 皿ばねの材料には、ディーテック有限会社製の Ti-Ni SMA(Ni-55.7wt%)の平板(板厚 0.6mm 幅 36mm 長さ 150mm)を使用する。形状記憶処理は熱処理温度 460°Cで熱処理時間一時間、その後水冷による急冷を行った。一軸引張試験より得られたこの材料の形状記憶処理後の応力ひずみ曲線を図 5.6 に示す。低温時ヤング率は $E_{low}=9797\text{MPa}$ 、高温時ヤング率は $E_{high}=44173\text{MPa}$ となった。後の計算で用いるポアソン比は三田氏らの Ti-Ni SMA(Ti-49.4 at%)の計測結果からポアソン比 $\nu = 0.43$ を用いた[25]。

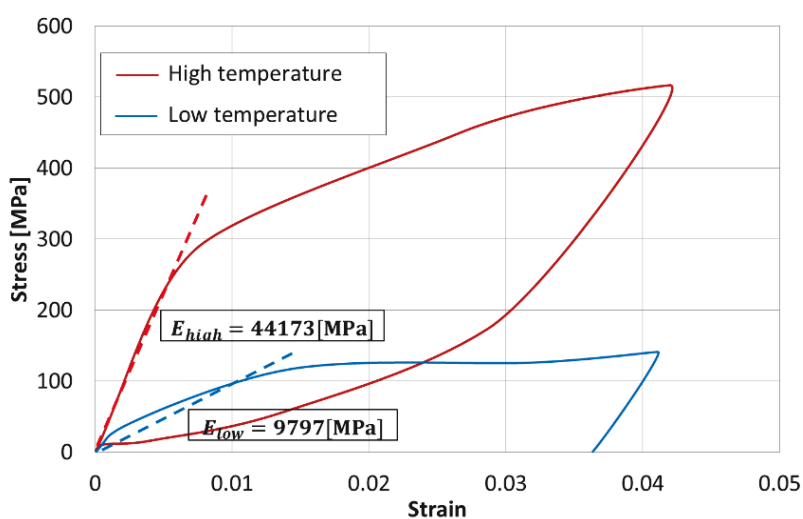


Fig. 5.6 Stress-strain curve of the material

5.3.2 Ti-Ni SMA 皿ばねの製造

製造は、まず特発三協製作所に依頼し、厚さ 0.6mm の SMA 平板をドーナツ型へのワイヤ切断と皿ばね形状への金型を用いたプレス加工(D: 30mm, d: 15mm, h: 1.4mm, t: 0.6mm)をした。その後、本研究室にて通常の皿ばね(Type A D: 31.5mm, d: 16.3mm, h: 0.9mm, t: 1.2mm を上下 1 枚ずつ、Type B D: 30mm, d: 15mm, h: 1.5mm, t: 0.5mm を上下 2 枚ずつ)で SMA 皿ばねを上下から挟み込みボルトで固定し上記の形状記憶処理(熱処理温度 460°Cで熱処理時間一時間、その後水冷)を施した。各工程の写真を図 5.7 に示す。製造した SMA 皿ばねの



Fig. 5.7 Picture of each process

寸法を表 5.2 に示す。

Table. 5.2 Dimensions of the SMA disk springs

	Type A	Type B
Diameter of outside : D	30mm	30mm
Diameter of inside : d	15mm	15mm
Effective height : h	0.76mm	0.99mm
Thickness : t	0.60mm	0.60mm
h/t	1.27	1.65

5.3.3 Ti-Ni SMA 皿ばねの計算値

5.2.2 節で示したように、皿ばねの荷重－たわみ関係式はアルメンラスロの近似式より次式で与えられる。

$$P = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h^3}{C_1 D^2} \delta \left[\left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{h} \right) \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) + 1 \right] \quad (5.1)$$

また、接線ばね定数は δ に関する 2 次式になり、次式で与えられる。

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h^3}{C_1 D^2} \left[\left(\frac{H}{h} \right)^2 - 3 \frac{H}{h} \frac{\delta}{h} + \frac{3}{2} \left(\frac{\delta}{h} \right)^2 + 1 \right] \quad (5.2)$$

次に皿ばねの荷重たわみ計算式(5.1)より製作した皿ばねの荷重たわみ曲線の計算値のグラフを図 5.8 と図 5.9 に示す。ヤング率は、

低温時 $E_{low} : 9796.68 \text{ N/mm}^2$ 高温時 $E_{high} : 44173.39 \text{ N/mm}^2$ (図 5.6) を用いる。

また、図 5.8 と図 5.9 においてグラフの右端点である最大たわみ量は皿ばねがたわみきる量である有効高さとなっている。

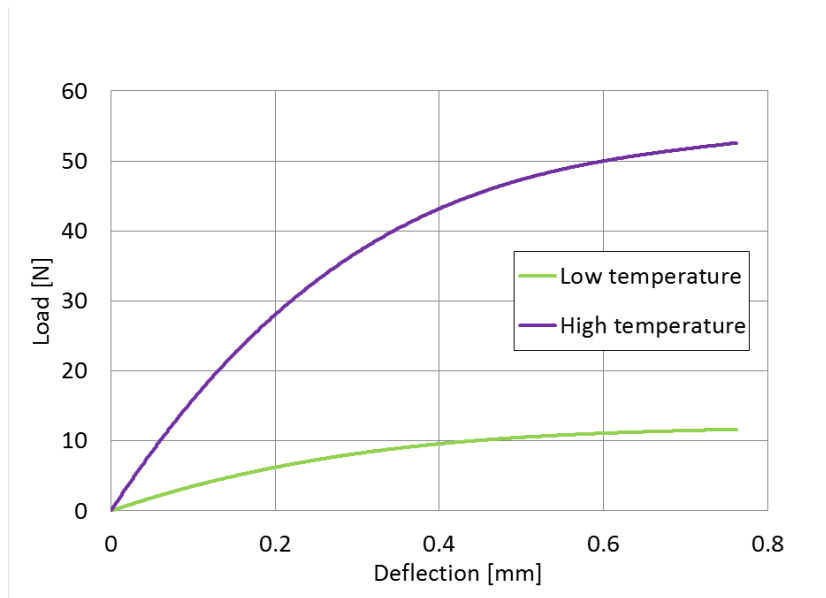


Fig. 5.8 Calculated value load-deflection of Type A

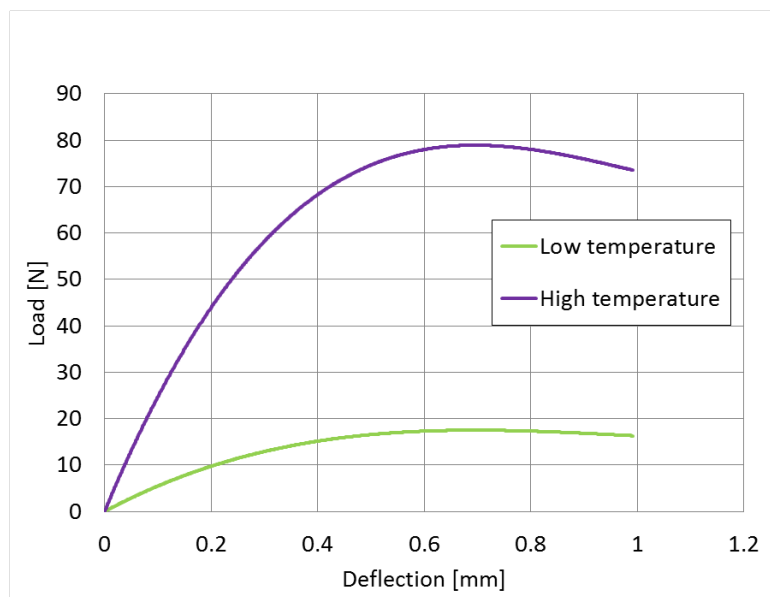


Fig. 5.9 Calculated value load-deflection of Type B

図 5.8 では仕様 A の H/h が 1.4 以下の為低温高温ともたわみきる状態まで極値を取ることとはない。図 5.9 では仕様 B の H/h が 1.4 以上であるため低温高温とも極値を取る形となっている。

次に、皿ばねの各部にかかる応力について説明する。図 5.2 に示す位置 I, II, III および IV の四隅での応力は次のように与えられる。なお主方向は横断面図 5.2 に垂直な円周方向である。

$$\sigma_{\text{I}} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h}{C_1 D^2} \delta \left[-C_2 \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) - C_3 \right] \quad (5.3)$$

$$\sigma_{\text{II}} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h}{C_1 D^2} \delta \left[-C_2 \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) + C_3 \right] \quad (5.4)$$

$$\sigma_{\text{III}} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h}{\alpha C_1 D^2} \delta \left[(2C_3 - C_2) \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) + C_3 \right] \quad (5.5)$$

$$\sigma_{\text{IV}} = \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{h}{\alpha C_1 D^2} \delta \left[(2C_3 - C_2) \left(\frac{H}{h} - \frac{\delta}{2h} \right) - C_3 \right] \quad (5.6)$$

ここで

$$C_1 = \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{\alpha-1}{\alpha} \right)^2}{\frac{\alpha+1}{\alpha-1} - \frac{2}{\ln \alpha}} \quad (5.7)$$

$$C_2 = \frac{1}{\pi} \frac{6}{\ln \alpha} \left(\frac{\alpha-1}{\ln \alpha} - 1 \right) \quad (5.8)$$

$$C_3 = \frac{3}{\pi} \frac{\alpha-1}{\ln \alpha} \quad (5.9)$$

とする。
ただし

$$\alpha = \frac{D}{d} \quad (5.10)$$

また円周が不変な点 O の座標は

$$C = \frac{\alpha-1}{\ln \alpha} \left(\frac{d}{2} \right) \quad (5.11)$$

また、先ほどの図 5.6 の曲線を 2 直線で近似して、見かけ上の降伏点とひずみ 4% の値となる応力を図 5.10 のようにとる。見かけ上の降伏点を (①,②)、繰り返し形状回復可能とされるひずみ 4% を (③,④) として、製作した皿ばねが局所的に見かけ上の降伏をしているのか、局所的なひずみが 4% を越えて永久ひずみが残らないかを判断することとする。

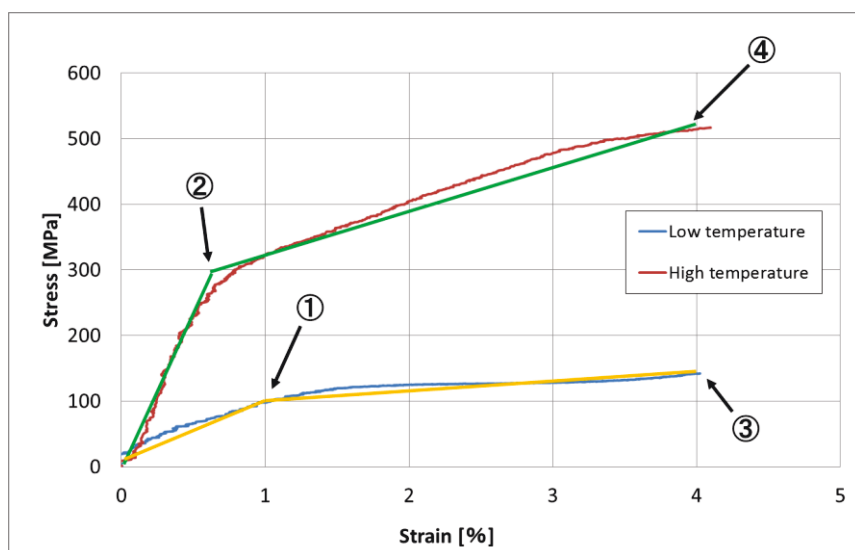


Fig. 5.10 Apparent yield point and 4% strain point

Table. 5.3 Stress of apparent yield point and 4% strain point

Apparent yield stress		
①Low temperature	1%	97MPa
②High temperature	0.70%	300MPa
Stress of 4% strain		
③Low temperature	4%	141MPa
④High temperature	4%	513MPa

SMA 皿ばねの仕様パラメータ

(仕様 A D : 30mm d : 15mm H : 0.762mm h : 0.6mm H/h=1.27)

(仕様 B D : 30mm d : 15mm H : 0.992mm h : 0.6mm H/h=1.65)

を図 5.2 に示す皿ばねの端点にかかる応力の式 5.3~5.6 に代入すると皿ばね端点にかかる

Table. 5.4 Deflection of apparent yield point and 4% point

Apparent yield deflection of type A	
Low temperature	1.533m m
High temperature	0.640m m
Apparent yield deflection of type B	
Low temperature	0.834m m
High temperature	0.374m m
Deflection of 4% strain of type A	
Low temperature	1.829m m
High temperature	1.652m m
Deflection of 4% strain of type B	
Low temperature	2.085m m
High temperature	1.089m m

見かけ上の降伏点時のたわみと、ひずみ 4%時のたわみを算出することができる。表 5.4 は見かけ上の降伏点と 4%時のたわみである。

表 5.4 の赤字部分は皿ばねの全たわみ量である有効高さを越えたたわみ量の域に達している。よって、Type A, Type B ともにたわみが有効高さと同値になっても、つまり完全に平板状に押しつぶされても永久ひずみが残らないことがわかる。

なお、最初に見かけ上の降伏点の応力値を超える端点は仕様 A 低温時では今回実験する全たわみの範囲で現れることなく、仕様 A 高温時では端点 I、仕様 B 低温時では端点 I、仕様 B 高温時では端点 I となった。また、最初にひずみ 4%時の応力値を超える端点は仕様 A 低温時、仕様 A 高温時、仕様 B 低温時、仕様 B 高温時全てにおいて今回実験する全たわみの範囲では現れることが無かった。

5.4 SMA 皿ばねの駆動実験

本実験では、製造した皿ばねに荷重をかけた時のたわみを低温時と高温時に分けて計測し、荷重たわみ曲線を求めて、低温時と高温時のたわみの差からアクチュエータとしての荷重特性を算出することを目的とする。

5.4.1 実験方法

一定温度下で皿ばねに重りを載せて荷重を 0N から 0.98N ずつ増加させて負荷し、その時のたわみを計測する。これを低温と高温でそれぞれ計測する。たわみの測定にはレーザ変位計 KEYENCE LK-030 を用いる。皿ばねの形状上、皿ばねにレーザ光を当てるのが難しいため、皿ばねの上に重りを置くために載せたアルミ平板にレーザ光を照射しそのアルミ平板の変位を計測し皿ばねのたわみとする。実験装置の概略図を図 5.11 に示す。冷却はスポットクーラによる空冷で約 15°C で行い、加熱は工業用ドライヤにより約 150°C まで加熱した。

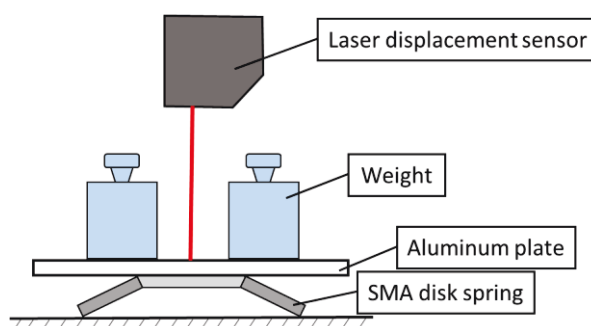


Fig. 5.11 Schematic drawing showing the experimental setup

5.4.2 実験結果

図 5.12 に、Type A と Type B の実験結果から得られた荷重特性と、アルメンラスロの近似式より得られた理論値をそれぞれ示す。ポアソン比は三田氏らの Ti-Ni SMA(0. Ti-49.4 at%) の計測結果からポアソン比 $\nu = 0.43$ を用いた[24]。Type B は h/t が 1.4 を超えており、アルメンラスロの近似式では荷重が極大点を迎えて飛び移り現象が発生するとされていたが、飛び移り現象は発生せず増加した。

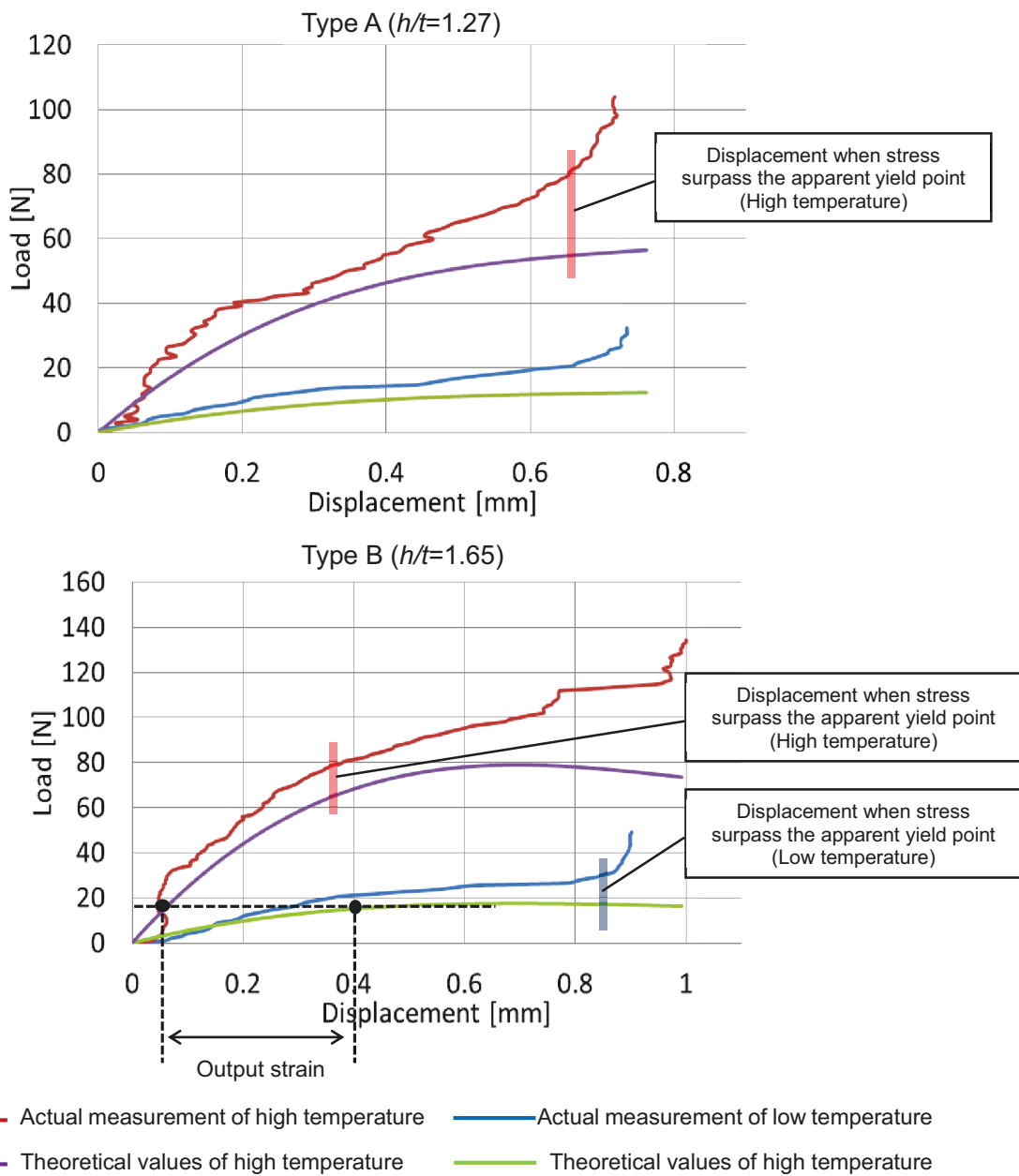


Fig. 5.12 Load-displacement curve of the SMA disk springs

実験結果より得られたアクチュエータとしての出力特性を図 5.13 に示す。出力変位は、図 5.12 の下のグラフに示すように、同じ荷重を付荷した時の低温時のたわみから高温時のたわみを引くことにより算出した。図 5.13 において縦軸は出力変位、横軸は荷重を示している。実験結果において Type A では、25N の荷重をかけた時、最大出力変位 0.62mm を発生し、それ以上の荷重では、出力変位は減少していることがわかる。同様に Type B では、32N の荷重をかけた時、最大出力変位 0.80mm を発生し、それ以上の荷重では、出力変位は減少している。

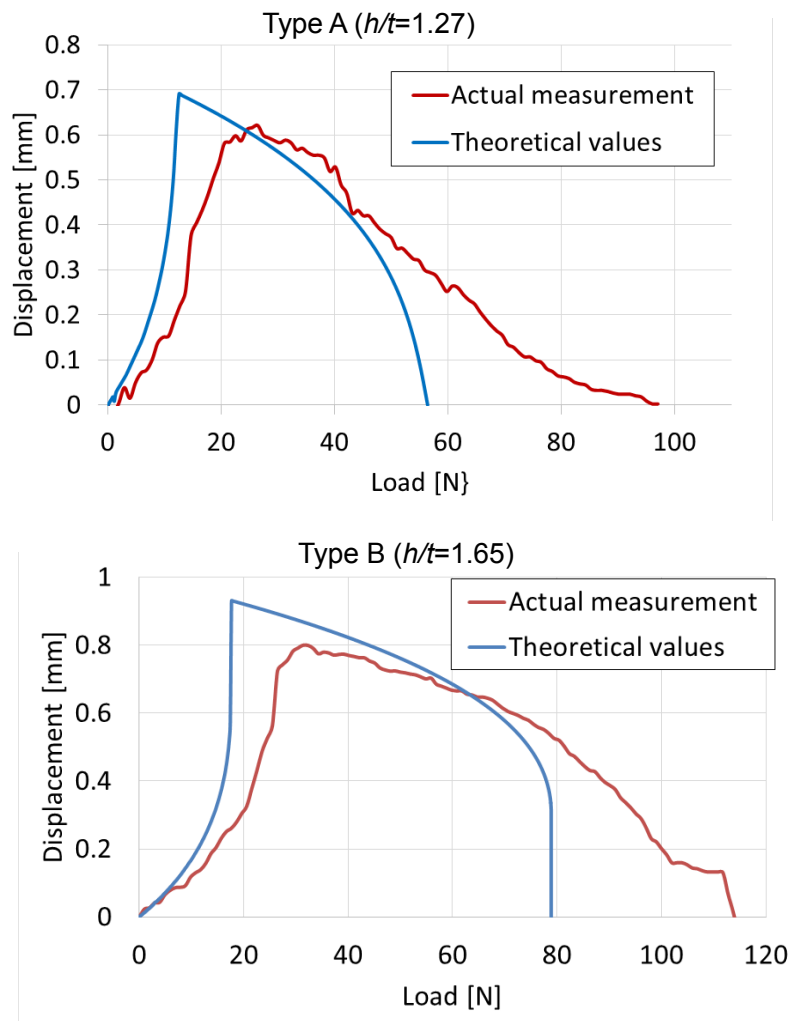


Fig. 5.13 Output characteristics of the SMA disk springs

5.4.3 考察

Type A で 24N の荷重を与えた時、0.62mm の出力変位(出力ひずみ 46%)、Type B では 30N の荷重を与えた時、0.8mm の出力変位(51.6%)を得ることができた。

図 5.1 と同様にして 30N の荷重を与えた時、8mm の出力変位を得られるという条件で圧縮コイルばねと比較する。SMA コイルばねの設計は、まずコイル径を実験で使用した SMA 皿ばねと同じ 30mm、有効巻き数を 4 と設定した。自然長は、低温下で 30N の荷重を与えた時、ばね長が密着高さと同値になるよう設定した。この条件のもと設計すると、線径 $d=5.2\text{mm}$ 、自然長 $H=43\text{mm}$ となり、図 5.14 のように必要なスペースはおよそ 37%になる。

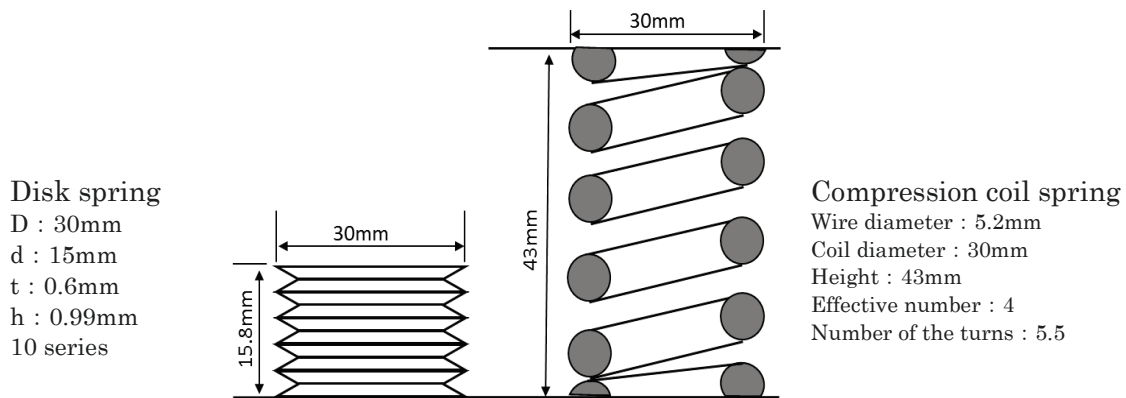


Fig. 5.14 Comparison between disk spring and coil spring

図 5.12 からわかるように、たわみが有効高さに近づくとグラフの傾きが急に大きくなっている。これはたわみが有効高さに近づくと荷重を増やしてもたわみがあまり発生していないことを示している。この現象には、製造した皿ばねの多少の歪みにより、たわみきる前に曲面の一部が接地していることが影響していると考えられる。よって、たわみが有効高さに達する付近の数値はデータとして有効ではないと考えることができる。また、図 5.12 のどちらのグラフにおいてもたわみが大きくなるにつれて、実測値と理論値のひらきが大きくなった。図 5.13 にもその影響が大きく出ていることがおり、荷重が大きくなるにつれて理論値と実測値に開きが見られる。この原因として以下の2つが考えられる。一つ目は、たわみが大きくなるにつれて皿ばねの断面形状が変化し、アルメンラスロの近似式の「断面は形状を変えずに剛体回転する」という仮定条件に一致しなくなったことが原因だと考えられる。二つ目は、アルメンラスロの近似式に用いるヤング率が一定であることである。たわみが大きくなり局所的なひずみが見かけ上の降伏点を越えると応力ひずみ曲線の勾配は緩やかになるが、ヤング率は常に一定という仮定のもとアルメンラスロの近似式にヤング率を用いているため、その違いが原因でたわみが大きくなると実験値と差がうまれると考えられる。

たわみが大きくなるにつれて図 5.13 のように、低温時に有効高さまでたわみきる時の荷重近辺で最大の出力変位が得られることがわかる。どちらの場合もアルメンラスロの近似式から得られた出力特性と実測値には、差異が発生した。次節ではより正確な性能評価を行うために有限要素法の解析手法について検討する。

5.5 SMA 皿ばねの解析

本章では、LS-DYNA の陰解法モードを用いた SMA 皿ばねの有限要素法解析の解析手法を確立し、それを用いて SMA 皿ばねの性能評価を行う。

5.5.1 モデル化

実験で用いた表 5.2 の Type A と Type B の 2 種類の SMA 皿ばねの解析を行う。モデルは Femap を用いて solid 要素で作成する[26]。メッシュは皿ばねの週方向に 16 分割し、そのそれぞれを面方向に 20×20 、厚さ方向に 6 分割する。材料特性は、低温時と高温時でわけて考える。低温時の材料特性は、弾性域と塑性域を 2 つの直線で近似する弾塑性体 (MAT_PLASTIC_KINEMATIC) を使用する。高温時は、超弾性合金のヒステリシスループを表現できる超弾性体 (MAT_SHAPE_MEMORY) を使用する[27]。用いた材料定数を図 5.16 と図 5.17 に示す。各値は実験結果より得られたものを使用する。

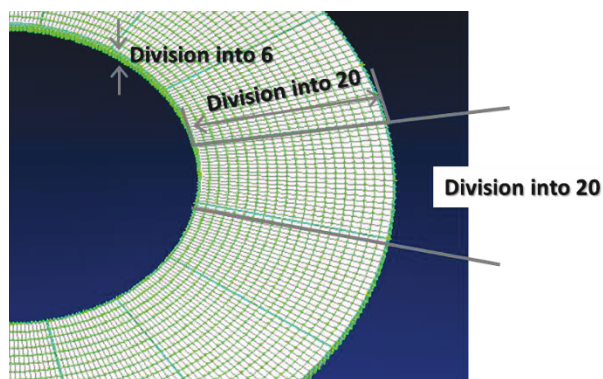
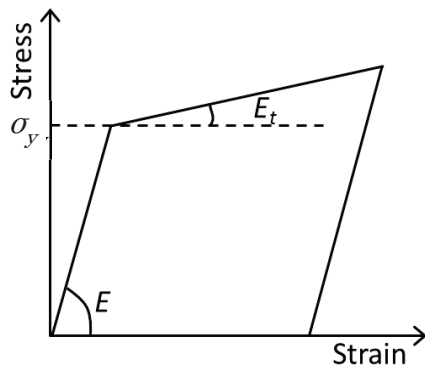
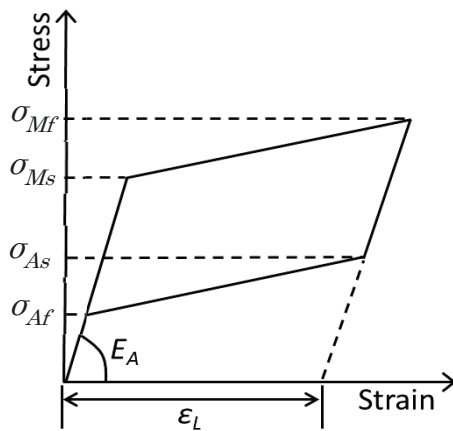


Fig. 5.15 Disk spring model



Low temperature	
E(GPa)	9.796
E_t (MPa)	666.2
σ_y (MPa)	120
Poisson's ratio	0.43
Density(g/cm ³)	6.4

Fig. 5.16 Material constant of elastic model under low temperature



High temperature	
E_A (GPa)	44.173
σ_{Ms} (MPa)	278.4
σ_{Mf} (MPa)	515.9
σ_{As} (MPa)	146.0
σ_{Af} (MPa)	53.29
ϵ_L	0.04
Poisson's ratio	0.43
Density(g/cm ³)	6.4

Fig. 5.17 Material constant of superelastic model under high temperature

5.5.2 解析条件

境界条件は以下の2点を用いた。

- ・接地する下部の節点においてZ軸方向の変位を拘束する。
- ・実験の様子から、上面に比べて下面は大きく滑っていることが確認できたため、上面の節点はx軸y軸方向に拘束し、下面には実験より得られた静止摩擦係数 $\mu=0.3153$ により摩擦をかける。

荷重はZ軸方向に対して1秒間に25Nの力を内側の上部の節点のみに与える。

5.5.3 解析結果

低温時、高温時の解析結果と実験結果を比較したものを図 5.18 に示す。また、解析結果からの出力変位と実験結果で得られた出力変位との比較を図 5.19 に示す。

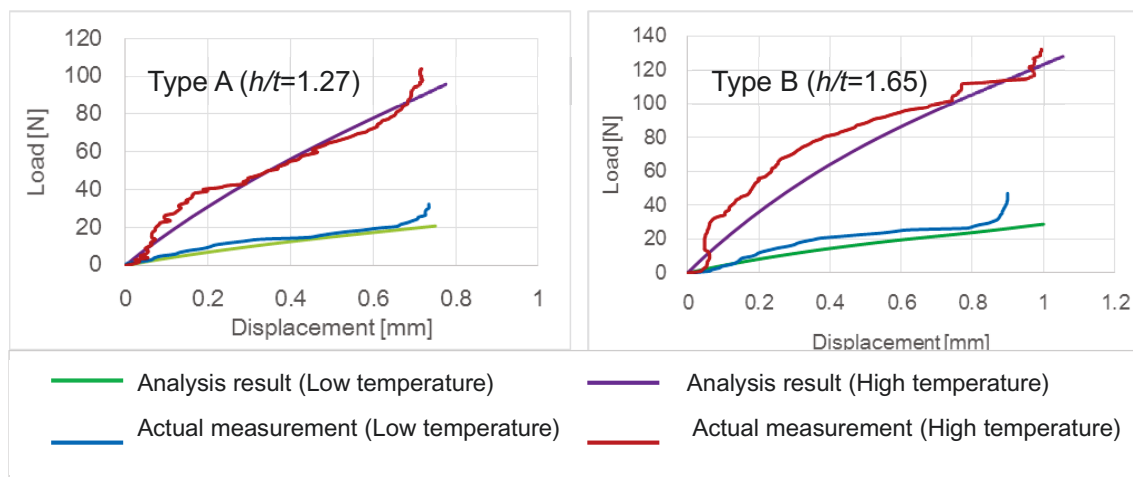


Fig. 5.18 Comparison between laboratory finding and analysis result in the Load - Deflection

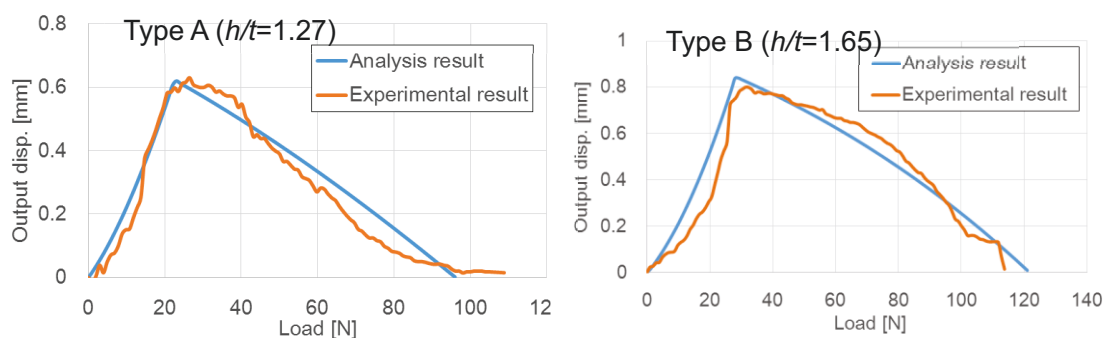


Fig. 5.19 Comparison between laboratory finding and analysis result in the Load - Deflection

5.5.4 考察

たわみが有効高さに達する直前の急激なたわみの荷重の上昇は再現できなかったものの、その他の点においては実験結果を再現できた。次節では、この解析手法を用いて SMA 皿ばねの性能評価を行う。

5.6 性能評価

5.6.1 解析条件

前節の解析手法を用いて SMA 皿ばねの性能評価を行う。皿ばねは有効高さ h と板厚 t の比である h/t の値によって、特性が大きく変化するため、今回は h/t を変化させた時の出力変位の値から、性能評価をしていく。ただし、外径 D と内径 d の値は固定する。

- ・ $h=0.6, 0.762, 0.9, 1.0$ で固定する。
- ・ $t=0.6, 0.75, 0.9$ で固定する。

5.6.2 解析結果

解析結果から得られた出力変位と h/t の関係を図 5.20 と図 5.21 に示す。図 5.20 は t を固定し h を変化させた結果を示し、図 5.21 は h を固定し t を変化させた結果を示している。また、図 5.22 は、出力変位を $(h+t)$ で割り無次元化した値と h/t の関係を示している。

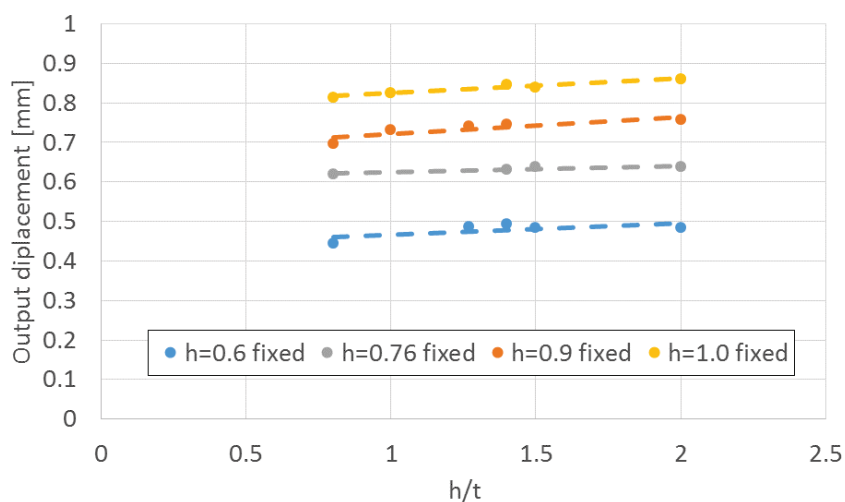


Fig. 5.20 Relations of h/t and output displacement when h is fixed

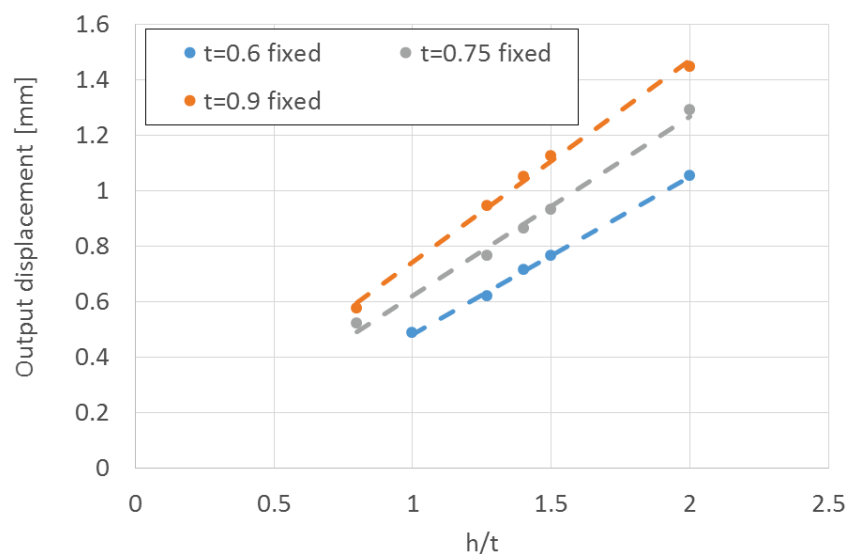


Fig. 5.21 Relations of h/t and output displacement when t is fixed

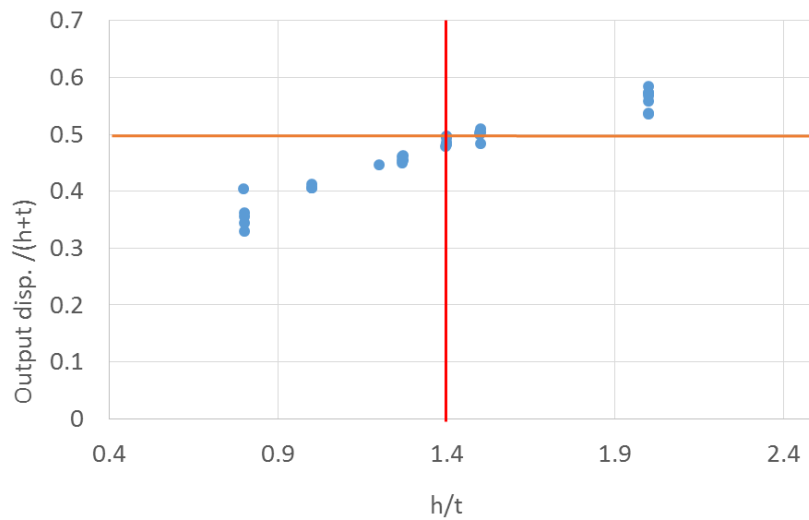


Fig. 5.22 Comparison between output displacement/($h+t$) and h/t

5.6.3 考察

図 5.20 と図 5.21 から、出力変位は有効高さ h の値に比例しており、板厚 t の値に対しては依存が低いことがわかる。

また、図 5.21 からわかるように、 h が大きくなるにつれて出力変位は大きくなるが、第 2 章で述べたとおり、皿ばねの特性として h/t が 1.4 を大きく上回る時、飛び移りといわれる現象が発生する可能性が高くなり皿ばねとして安定しない。図 5.22 が示すように、 h/t の値が 1.4 のとき、出力変位は $(h+t)$ のおよそ 0.5 倍になる。これは SMA 皿ばねを設計する際に重要な指標として考えることができる。

5.7 結論

本研究では、SMA の平板から SMA 皿ばねを製造する方法を確立し、製造した皿ばねの出力特性を実験により明らかにした。また FEM 解析を実施し解析手法と性能評価を行った。以下にその結論を述べる。

- (1) Ti-Ni SMA の平板をドーナツ型へワイヤ切断し皿ばね形状への金型プレス加工を施した後、通常の皿ばねに上下から挟み込んで固定し形状記憶処理をすることにより、SMA 皿ばねを製造した。
- (2) 製造した皿ばねの出力特性を実験により明らかにした。材料自体の局所ひずみを 4%以内に抑え、50%以上の出力ひずみを得られた。これを直列に重ね合わせたものをコイルばねと比較した場合、37%ほどのスペースで同等の出力を得られることになる。
- (3) LS-DYNA の陰解法モードを用いた SMA 皿ばねの FEM 解析を行い、実験結果と比較することにより整合性を確認し、解析手法を確立した。
- (4) 上記の解析手法を用いて SMA 皿ばねのアクチュエータとしての性能評価を行った。その結果、出力変位は、有効高さ h の値に比例しており、板厚 t の値に対しては依存が低いことがわかった。また、 h/t の値が 1.4 のとき、出力変位は $(h+t)$ のおよそ 0.5 倍になることがわかった。

第 6 章 鉄系 SMA を用いた二方向性アクチュエータ

ここまで扱ってきたのは Ti-Ni SMA であるが、Ti-Ni SMA の欠点のひとつとして高コストであることが挙げられる。そこで本論文の最後に、低コストで生産できる鉄系 SMA のアクチュエータへの応用の可能性について言及する。

6.1 鉄系 SMA について

1980 年代に東京工業大学の森氏らによって発見された鉄系 SMA に近年注目が集まっている。鉄系形状記憶合金は大量生産に至れば Ti-Ni SMA の 1/10~1/20 のコストで生産できるとされており非常に低コストである[28, 29]。しかし Ti-Ni SMA が 2 方向性の変化を示すのに対し、鉄系 SMA は一方向性しか変化しない。また、鉄系 SMA は比較的相変態応力が高く、すべり変形が起こりやすい。すべり変形が発生すると永久ひずみが残ってしまい、繰り返し形状記憶効果も発現しないとされてきた。このような二つの特徴からパイプやクレーンレールなどの締結に用いられるように、比較的大型かつ形状記憶効果を 1 回きりしかしない接続部材等への応用が考えられてきた。これまでにアクチュエータなどの繰り返し形状記憶効果を利用した実用例はない。

これまでの形状記憶効果に関する研究により、Si を加えることによりオーステナイトでの降伏強さが増加し、また積層欠陥エネルギーが低下し Fe-Mn-Si SMA がほとんど完璧な形状回復を示すなど材料特性の向上が報告されている[30, 31]。さらに、Cr を加えることで、耐腐食性が向上するとともにより強い形状記憶効果を得られることが報告されている[32, 33]。

このような材料特性の向上により繰り返し形状記憶効果の発現も可能なのではないかと考えた。そこで本研究では繰り返し単軸引張試験を行い、鉄系 SMA の繰り返し形状記憶効果を観察する。その後、これまで実用例のない鉄系 SMA の繰り返し形状記憶効果を利用した二方向アクチュエータを検討・製作し作動時実験を行うことにより、鉄系 SMA の新しい応用の可能性を示す。

6.2 鉄系 SMA の繰り返し形状記憶効果に関する実験

単軸引張変形と形状回復を繰り返し行い、鉄系形状記憶合金の繰り返し形状記憶効果を観察する。

6.2.1 試験片

本研究では、淡路マテリアル株式会社より提供していただいた外径 32.0 mm の Fe-28Mn-6Si-5Cr 鉄系形状記憶合金の丸棒から以下の形状の試験片を切り出し、トレーニング処理(予ひずみ 2.5 % 形状回復処理 600 °C で 45 分)を 3 回施して、使用する。試験片の寸法を図 6.1 に示す。また図 6.2 にこの形状記憶合金の高温時と低温時の応力ひずみ曲線を示す。

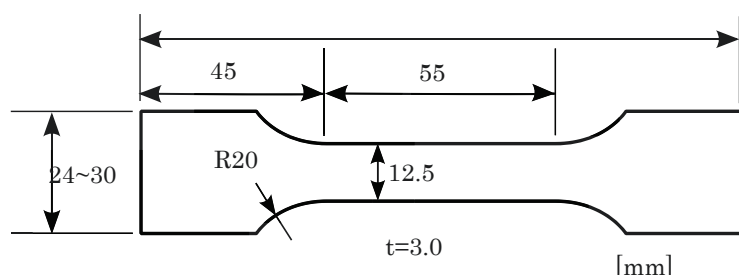


Fig. 6.1 Dimensions of the specimen

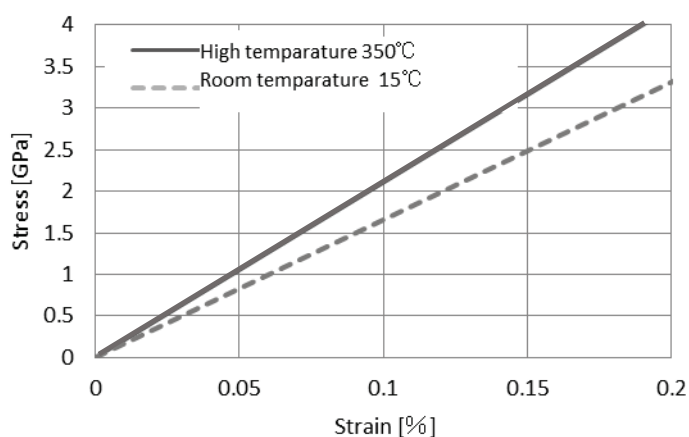


Fig. 6.2 Stress-strain curve of Fe-28Mn-6Si-5Cr SMA

6.2.2 実験装置図

図 6.3 に実験に使用した測定装置の概略を示す。荷重はオートグラフ IS-10T を使用し、ひずみは伸び計を用いて測定を行う。加熱はリボンヒーターを用い温度センサと連動した温度調節コントローラ MTCS により加熱温度を制御し、冷却はスポットクーラーによる空冷で行う。

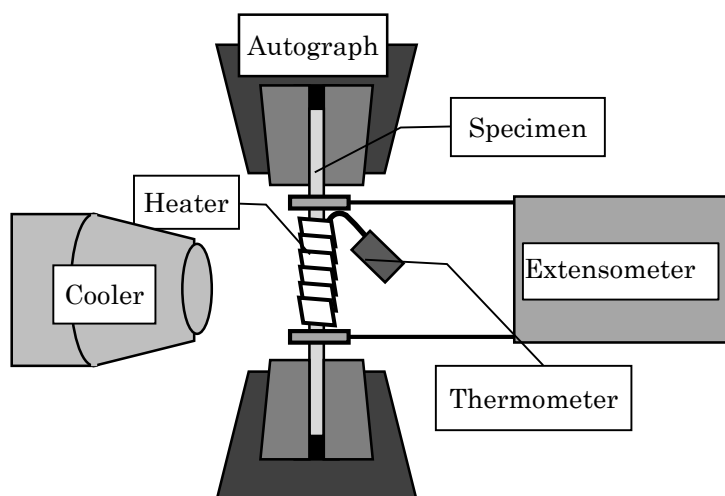


Fig. 6.3 The scheme of the experimental apparatus

6.2.3 実験方法

オートグラフに試験片を取り付け、指定の予ひずみを得るまで 3 mm/sec で引張り(図 6.4-①)、その後荷重がなくなるまで戻す(図 6.4-②)。そして形状回復を行うため、リボンヒーターと温度コントローラで 380 °C まで加熱し試験片全体に熱を行き渡らせるため、5 分間その温度を保持する。このとき形状回復応力が発生する。次に除荷した後に、スポットクーラを用いて再び常温まで戻す(図 6.4-③)。最後にもう一度除荷を行う(F 図 6.4-④)。これを 1 サイクルとし、このサイクルを繰り返す。今回は 1 %、1.5 % と 2 % の予ひずみの測定を 100 回、それぞれの試験片で行う。この試験で鉄系形状記憶合金の繰り返し変形による、形状記憶効果の変移を観察していく。

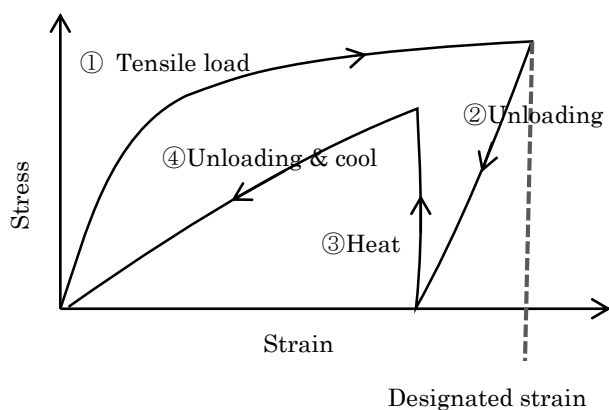


Fig. 6.4 Procedure of experiment

6.2.4 実験結果

図 6.5 から図 6.7 に各予ひずみを与えた時の実験結果から得られた応力ひずみ曲線を示す。

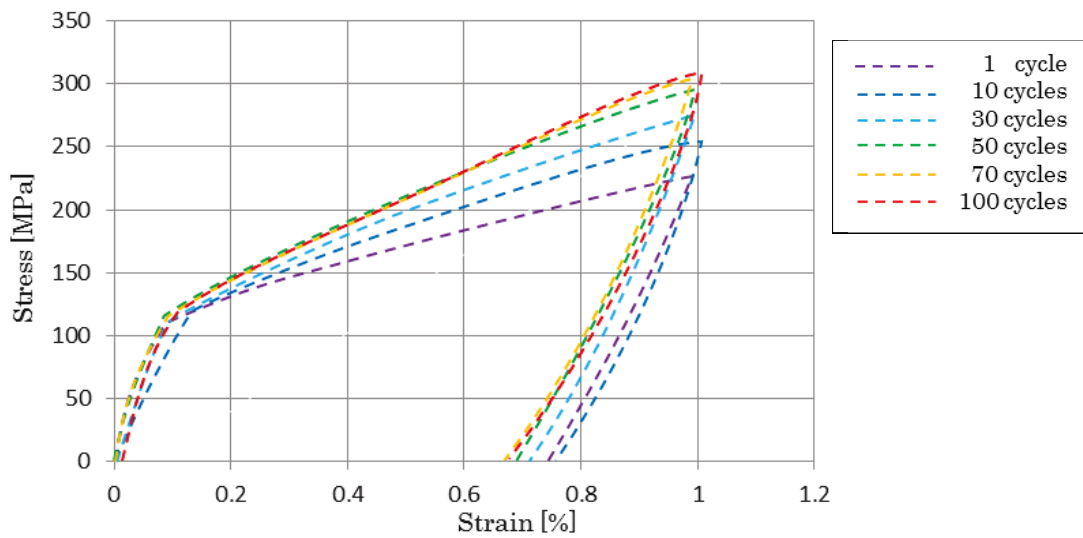


Fig. 6.5 Stress-strain curve when prestrain is 1%

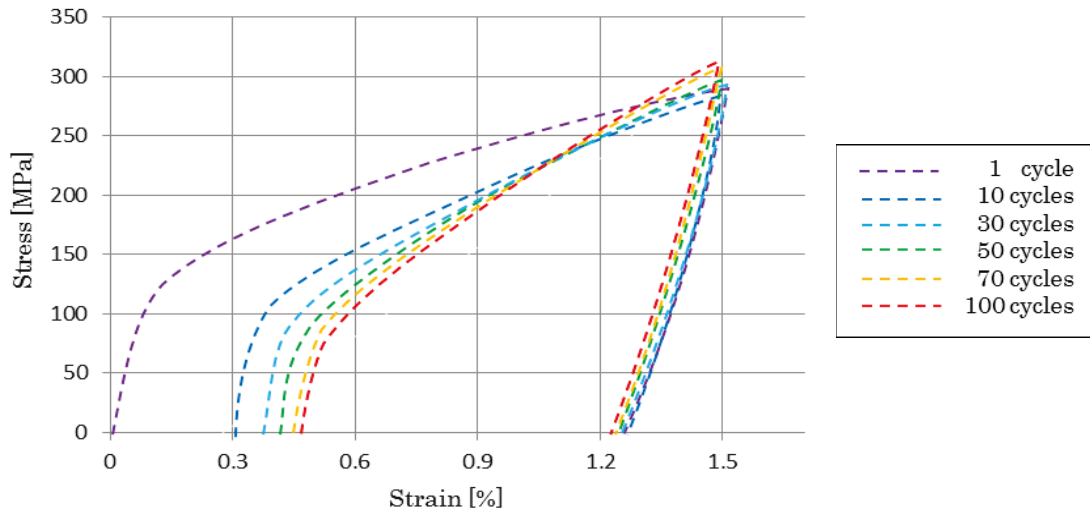


Fig. 6.6 Stress-strain curve when prestrain is 1.5%

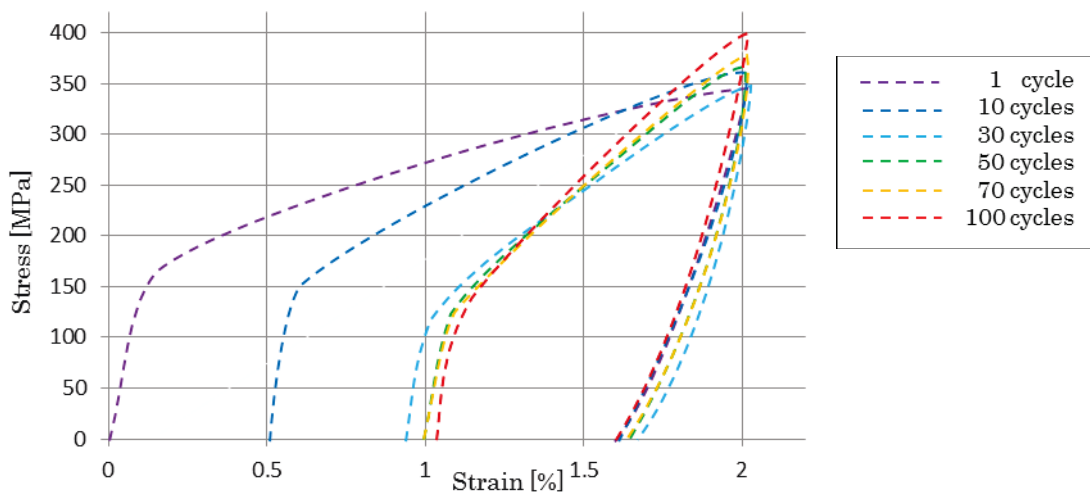


Fig. 6.7 Stress-strain curve when prestrain is 1.5%

また図 6.8 に繰り返し形状回復の回数による形状回復率の変化を示す。

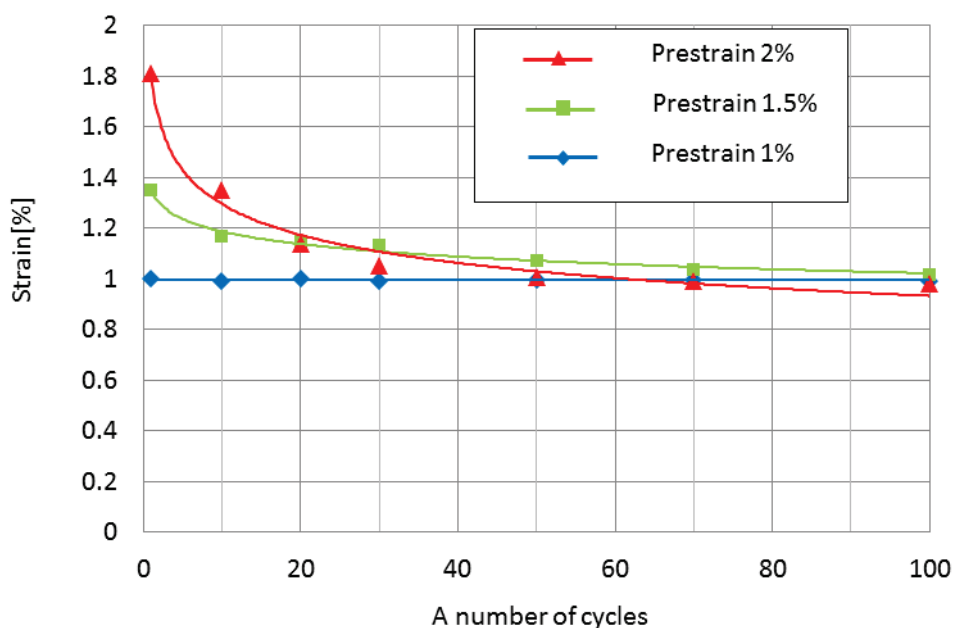


Fig. 6.8 Change of the shape recovery strain

6.2.4 考察

図 6.5 から図 6.7 より、繰り返し回数が多くなるにつれ、応力が上昇しており加工硬化が発生していることがわかる。与ひずみ 1%では 100 サイクル目においても形状回復率がほぼ 100%である。

比較して、予ひずみ 1.5%のとき、形状回復率は次第に低下していく。100 サイクル行くと形状回復率約 70%に収束していった。また 2%では 10 サイクル目にして 75%ほどに低下するが、50 サイクルから 100 サイクルまで形状回復率が 50%に収束していった。100 サイクルまではひずみ 1%程の変形ならばほぼ完全に形状が回復することが分かった。予ひずみ 1%の繰り返し引張試験の結果とは異なり、形状回復率 100%とはいかなかったが、予ひずみ 1.5%と 2%の結果のように、形状回復率はある値に収束していった。また、形状回復ひずみは 100 サイクル行くと、全ての場合で 1%の形状回復ひずみを得ることが可能であるとわかる。これにより、予ひずみ 1%以内の繰り返しであれば、少なくとも 100 回はほぼ完全な形状回復が発現することがわかり、Fe-Mn-Si-Cr 形状記憶合金でも繰り返し形状回復効果を用いた応用の可能性があることを示している。

全ての予ひずみで最終的に形状回復ひずみが 1%程に収束した原因は、加工硬化により転位の移動が難しくなりすべり変形が発生しなくなったことと、マルテンサイト誘起応力が低下し優先して応力誘起マルテンサイト変態が起きたためと考えられる。

6.3 二方向性アクチュエータの設計

6.3.1 バイアスばねを用いた二方向素子の原理

鉄系形状記憶合金は一方向性しか示さないが、バイアスばねを組み合わせることで二方向性を得ることができる。これはこの合金が高温側のオーステナイト相で弾性係数が大きく、低温側のマルテンサイト相で弾性係数が小さいという性質を利用している。3.3節で例に挙げたシンプルなアクチュエータと同様に、まず SMA ばねとバイアスばねを図 6.9 のように互いに押し合うように組み込む。低温のとき SMA ばねはバイアスばねの力に負けて、右側に押されている。しかし加熱して高温になると SMA ばねの力がバイアスばねに打ち勝ち逆に左側に押し返す。そして温度が下がり、変態点より低くなると SMA ばねは右側に押し込まれ、これにより二方向性動作を得ることができる[12][14]。

このアクチュエータの出力は図 6.10 のような荷重変位線図を用いて算出される。バイアスばねによる負荷直線は図中の黄色の直線のように、形状記憶コイルの直線と反対に傾斜しており、勾配がばね定数に相当する。横軸との交点はバイアス力 0 に対応する。出力変位 δ と出力荷重 F は図の左側のようにになる。理想変位 A は、摩擦がなく出力荷重 F を 0 とした時の出力変位 δ である。

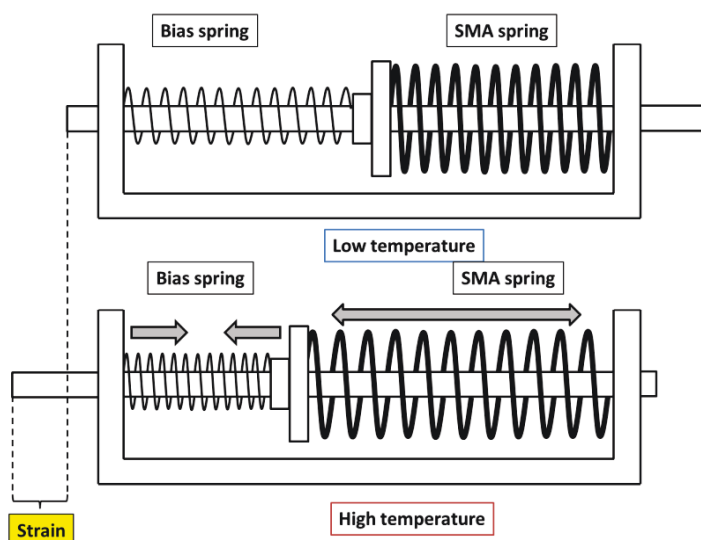


Fig. 6.9 The outline block diagram of the linear actuator

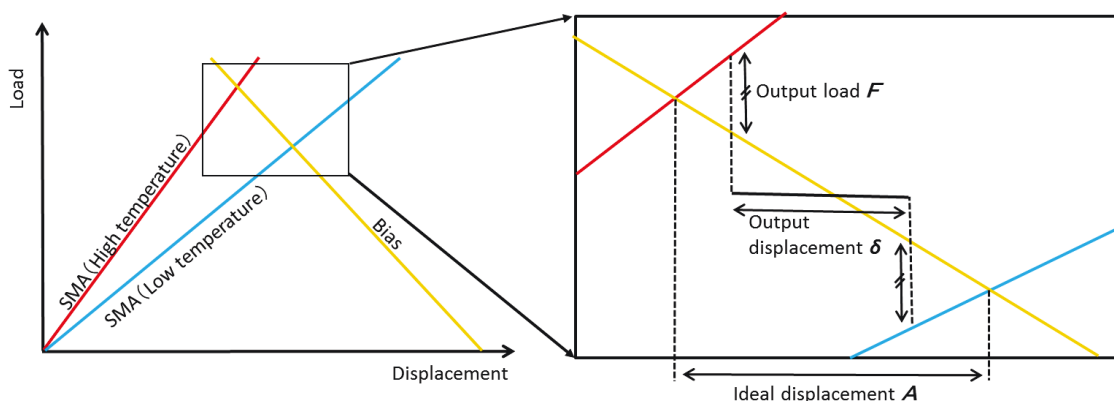


Fig. 6.10 Load-displacement diagram to use for the calculation of the theoretical value

この図より、出力変位と出力荷重を計算する関係式を表すと、式 6.1 のようになる。

$$\delta = A - \frac{(2K_b + K_h + K_l)}{(K_b + K_h)(K_b + K_l)} F \quad (6.1)$$

ここで、 K_b はバイアスバネ定数、 K_h は高温時 SMA バネ定数、 K_l は低温時 SMA バネ定数を表す。

新型の鉄系形状記憶合金 Fe-28Mn-6Si-5Cr の丸棒直径 10 mm 長さ 200 mm を業者に外注し伸線加工により、直径 1.5 mm のワイヤに加工したものを使用し形状記憶合金バネにした。表 6.1 に形状記憶合金バネの仕様を示す。なおバネ定数 $K_h \cdot K_l$ はバネ定数を求める式である式 6.2[34]を用いて算出した。ここで使用した鉄系形状記憶合金の横弾性係数 G は高温時 76.7 GPa、低温時 60.4 GPa である。

$$K = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (6.2)$$

Table 6.1 Specifications of each spring

SMA spring	Wire diameter d	1.5[mm]
	Number of turns N	30
	Coil diameter D	39[mm]
	Natural length L_s	220[mm]
	Spring coefficient of high temperature K_h	0.0273[N/mm]
	Spring coefficient of low temperature K_l	0.0215[N/mm]
Bias spring	Natural length L_b	250[mm]
	Spring coefficient K_b	0.0196[N/mm]
	Length of structure L	180[mm]
	Theoretical displacement δ	7.97[mm]

6.3.2 アクチュエータの設計

前述した SMA バネの諸元を基に、バイアスバネと組み合わせた二方向性素子の設計を行った。図 6.9 に設計図を示す。

本設計での可変数はバイアス自然長 L_b ・バイアスバネ定数 K_b ・総変位 Δ である。総変位 Δ とはバイアスバネと形状記憶合金バネのつり合いの位置における自然長からの変位量の和であり、バイアスバネの自然長と機構全体の長さにより決まる。機構全体の長さは 180 mm・200 mm・220 mm の 3 種類で検討を行う。バイアスバネはバネ長さ 50 mm・バネ定数 0.05 N/mm と長さ 50 mm・バネ定数 0.098 N/mm のものを 5 個ずつ用意し組み合わせて設計する。

また、適当な組み合わせでアクチュエータを製作し予備実験を行った。これにより得られた出力変位 δ を式 6.1 に代入し、出力荷重 F を算出した。このときの F が機構で発生する摩擦力(機械損失)に相当し、摩擦力は $F=0.197\text{ N}$ となった。

機構長とバイアスバネのすべての組み合わせを式 6.1 に代入して出力変位 δ を算出した結果、最大変位が得られるのはバイアスバネ係数 0.0196 N/mm ・バイアスバネ自然長 250 mm ・機構長さ 180 mm の条件で、出力変位 δ が 8.0 mm になった。

6.4 ばね型アクチュエータの作動実験

本実験では設計した SMA ばねを用いた二方向性素子が実際に作動するかどうかを確かめることを目的とする。変位量を測定し理論値と比較を行う。製作したアクチュエータの写真を図 6.11 に示す。

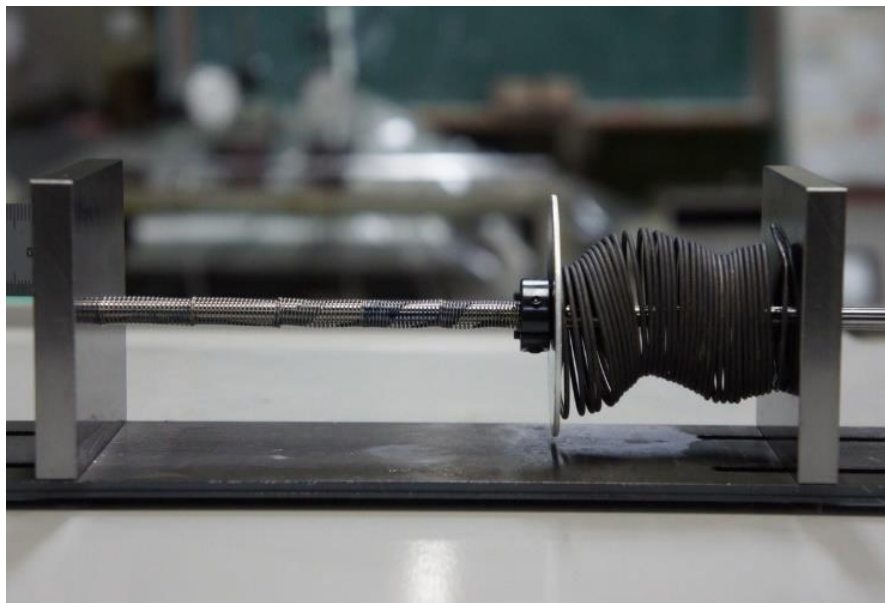


Fig. 6.11 The picture of the Fe-based SMA actuator

6.4.1 実験方法

製作した鉄系形状記憶合金バネ型アクチュエータを、工業用ドライヤで変態終了温度まで加熱する。加熱終了と同時に変位を測定する。スポットクーラで冷却を行い、再度変位を測定する。これを 1 サイクルとし 10 サイクルの作動の変位を測定する。

6.4.2 実験結果

作動実験の結果を表 6.2 に示す。なお 1 サイクル目は摩擦によりつり合いの位置が不正確なため 2 サイクル目から 11 サイクル目の結果を載せる。

Table 6.2 Result of the operating experiment

Cycles	Displacement (mm)
2	8
3	8
4	8.5
5	8
6	8
7	7.5
8	7
9	7
10	7
11	7.5
Average	7.65

6.4.2 考察

変位量を実験で計測した値と理論値で比較する。表6.3のように誤差は4%ほどであった。

Table 6.3 Comparison between experimental value and theoretical value

	Displacement
Experimental value	7.65 [mm]
Theoretical value	7.97 [mm]
Discrepancy	4.0%

理論値を計算する際に予備実験を行い、機械損失荷重を計算に考慮したため誤差はほとんどなく正確な理論値を算出することができた。今回はアクチュエータに使用した台板の制限により実験できなかったが、この理論で計算すると、機構長さを140 mmまで短くした場合、理論値では10.3 mmの変位を得られることになる。また今回の出力変位は出力荷重0とした時の値であるが、この理論を用いて計算すると変位5.3 mm・出力荷重10gfを出すことが可能である。センサとしての応用は十分可能であると考ええる。この鉄系形状記憶合金はTi-Ni合金よりも高温の環境で使用できるので、今まで用いることの出来なかった環境において低コストでの応用が期待できる。

6.5 結論

本研究では鉄系形状記憶合金の繰り返し変形の特性的調査と、繰り返し形状回復を利用した二方向性アクチュエータの設計製作、評価を行った。以下に各項目について結論を述べる。

(1)繰り返し引張試験による形状回復効果の変移

・与ひずみ 1%に留めれば、鉄系 SMA の形状回復率は 100 サイクル目でもほぼ 100%を維持した。

・これにより繰り返し形状回復効果を利用した二方向性アクチュエータの可能性を示した。

(2)二方向性アクチュエータの設計製作と評価

・この二方向性アクチュエータからは 7.7 mm の変位量を得ることが出来た。誤差 4%ほどとほとんど理論値通りに製作することが出来た。

今後の研究課題は二方向性アクチュエータとして実用的な応用をするには、よりサイクル数の多い疲労特性の解明が必須ということである。引張試験では 1%以内のひずみなら 100 サイクル目でも形状回復率を維持したが、これ以上の回数は不明である。より多くの繰り返し変形に耐えられるかどうか確かめる必要がある。

鉄系 SMA は Ti-Ni SMA と比べてヒステリシスが大きく、また非常に安価であるという特徴がある。高い作動温度が求められる場所や商業的にコストを抑えなければならない場所での応用が期待できる。

7 結論

以下に各アクチュエータのそれぞれの結論をまとめ、最後に総括を述べる。

7.1 コイル型 Ti-Ni SMA を用いたトルクアクチュエータ

コイル状に加工した Ti-Ni 形状記憶合金と、同様にコイル状に加工した Ti-Ni 超弾性合金をバイアスとして組合せ、コイルの線方向の伸びを利用し SMA の高温時と低温時の縦弾性係数の差により駆動する熱駆動型の高性能トルクアクチュエータを開発した。

直線のワイヤを用いた予備実験の結果から理論値では 10[degree]の変位を得られることとなったが、本実験の結果は 3[degree]しか得られなかった。この主な原因はコイルと円筒の摩擦と考えられる。その為、変位の増加には円筒を多段化するなどの改良が必要となる。

トルクは最大 0.25[Nm]であった。同じ寸法の電動モータと比較すると 10 倍近くの高いトルクが得られた。コイルの線径を大きくすることでさらに高いトルクを発生することができる。

7.2 Ti-Ni SMA ねじりばねを用いたトルクアクチュエータ

熱駆動型の機構自体にセンサ兼アクチュエータとしての働きを見せる形状記憶合金を用いたねじりばね型アクチュエータの設計開発に成功した。

- (1) 線形弾性体ではなく、塑性変形域まで使用する形状記憶合金を用いたねじりばね型トルクアクチュエータの設計式の算出を行った。
- (2) 実験の理論値と出力トルクはほぼ一致したことから導入した計算式は正しいと考えられる。
- (3) トルクアクチュエータに関して温度変化だけで既存のトルクを発生させるアクチュエータと比較して有用であるかを検討した。

同じようにトルクと出力角を出力することが可能な既存のロータリーアクチュエータと比較しても起動時の最大トルクでは既存のアクチュエータ以上の性能を示すことが出来た。また、センサ兼アクチュエータという点でもより簡単な機構でコンパクトなアクチュエータとして使用することが出来ることがわかった。

これまでリニアな駆動を回転方向に変換して実用化されてきた換気扇の開閉などへの応用が期待できる。

7.3 Ti-Ni SMA を用いた編目型アクチュエータ

本研究では、Ti-Ni SMA を用いて 2 種類の編目型アクチュエータを製作し、その機械特性と出力特性を計測した。

最大変位 5%ほどの Ti-Ni 形状記憶合金を用いてメリアス輪編み・ガーター輪編みの 2 種類のアクチュエータを製作し、メリアス輪編みで最大形状回復率 119%、最大仕事量

0.14N/m、ガーター編みで最大形状回復率 173%、最大仕事量 0.07N-m の形状回復率を得られた。

編み方により出力特性が変わることがわかった。本研究では、編み方を変えた 2 種類のアクチュエータを製作したが、線径・ピッチ・目数を変えることにより様々な設計ができる。今後の課題としては、目的に合わせた設計を行うために挙動のモデル化を行う必要がある。

本研究で開発した編目型アクチュエータは、人口筋肉のひとつとしてロボットの動力システムや、駆動音がしないという特徴を活かして高齢者の運動補助などへの応用が期待できる[8]。また、筒状のアクチュエータに独立した複数の加熱装置を装着し制御することにより、ミミズ型ロボットを製作することも可能になる。これは筒状ロボットの直径を変えることができる。形状変化のみで移動が可能となり、災害現場などの複雑な地形の中にも侵入することができ、生存者の発見などに活用できる。また体温に近い変態温度なので、このミミズ型ロボットをナノサイズで作ることで、血管に侵入し目的の血管まで自律的に進行し細くなった血管の拡張を行い、動脈狭窄症の治療を行う等、医療分野への応用は広く想定される。

7.4 Ti-Ni SMA を用いた皿ばね型アクチュエータ

本研究では、SMA の平板から SMA 皿ばねを製造する方法を確立し、製造した皿ばねの出力特性を実験により明らかにした。また FEM 解析を実施し出力特性の推定が可能な解析手法を確立すると共に、様々な寸法の SMA 皿ばねの性能評価を行った。以下にその結論を述べる。

(1) Ti-Ni SMA の平板をドーナツ型へワイヤ切断し皿ばね形状への金型プレス加工を施した後、通常の皿ばねに上下から挟み込んで固定し形状記憶処理をすることにより、SMA 皿ばねを製造した。

(2) 製造した皿ばねの出力特性を実験により明らかにした。材料自体の局所ひずみを 4%以内に抑え、50%以上の出力ひずみを得られた。これを直列に重ね合わせたものをコイルばねと比較した場合、37%ほどのスペースで同等の出力を得られることになる。

(3) LS-DYNA の陰解法モードを用いた SMA 皿ばねの FEM 解析を行い、実験結果と比較することにより整合性を確認し、解析手法を確立した。

(4) 上記の解析手法を用いて SMA 皿ばねのアクチュエータとしての性能評価を行った。その結果、出力変位は、有効高さ h の値に比例しており、板厚 t の値に対しては依存が低いことがわかった。また、 h/t の値が 1.4 のとき、出力変位は $(h+t)$ のおよそ 0.5 倍になることがわかった。

このアクチュエータは熱駆動であり、アクチュエータ及びセンサとしての役割もあるので、エンジンなどの熱の発生する機構に組み込むことを想定している。例えば、エンジン内の可変動弁は出力性能だけでなく燃費や排気の改善を期待でき、近年普及が進んでいる[35]。この可変動弁の駆動には現在油圧が用いられているが、そこに皿ばねを応用できるのではないかと考えている。

7.5 鉄系 SMA を用いた二方向性アクチュエータ

本研究では鉄系形状記憶合金の繰り返し変形の特性の調査と、繰り返し形状回復を利用した二方向性アクチュエータの設計製作、評価を行った。以下に各項目について結論を述べる。

(1) 繰り返し引張試験による形状回復効果の変移

- ・与ひずみ 1%に留めれば、鉄系 SMA の形状回復率は 100 サイクル目でもほぼ 100%を維持した。

- ・これにより繰り返し形状回復効果を利用した二方向性アクチュエータの可能性を示した。

(2) 二方向性アクチュエータの設計製作と評価

- ・この二方向性アクチュエータからは 7.7 mm の変位量を得ることが出来た。誤差 4%ほどほとんど理論値通りに製作することが出来た。

今後の研究課題は二方向性アクチュエータとして実用的な応用をするには、よりサイクル数の多い疲労特性の解明が必須ということである。引張試験では 1%以内のひずみなら 100 サイクル目でも形状回復率を維持したが、これ以上の回数は不明である。より多くの繰り返し変形に耐えられるかどうか確かめる必要がある。

鉄系 SMA は Ti-Ni SMA と比べてヒステリシスが大きく、また非常に安価であるという特徴がある。高い作動温度が求められる場所や商業的にコストを抑えなければならない場所での応用が期待できる。

7.6 総括

本研究では、SMA を用いたアクチュエータの開発を行い、その出力特性などを明らかにした。本研究で開発したアクチュエータを実用化するには、疲労特性など明らかにすべきものは多数あるが、SMA の新たな応用の可能性を示すことができた。

参考文献

- [1] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials and Design*, Vol. 56, 1078-1113 (2014).
- [2] G. B. Kauffman, and I. Mayo, *The Chemical Educator, The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications*, Vol. 2, 1-21 (1997)
- [3] M. H. Wu, and L. M. Schetky, INDUSTRIAL APPLICATIONS FOR SHAPE MEMORY ALLOYS, International conference on shape memory and superelastic technologies, Pacific Grove, California, 171–182 (2000)
- [4] D. Hartl, and D. C. Lagudas, Aerospace applications of shape memory alloys, *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol.221, 535-552 (2007)
- [5] L.G. Machado, and M.A. Savi, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, Vol. 36, 683-691 (2003)
- [6] M. Samadpour, H. Asadi, Q. Wang, Nonlinear aero-thermal flutter postponement of supersonic laminated composite beams with shape memory alloys, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Volume 57, May–June 2016, 18–28 (2016)
- [7] K. N. Melton, *Shape Memory Materials*, Ed. by K. Otsuka, and C. M. Wayman, Cambridge University press, Cambridge (1999) pp. 220-239.
- [8] S. Dono, A. Saito, and T. Kuwata, Knit Structure SMA Actuator for Wearable Artificial Muscle Systems, Matsushita Electric Works Technical Report, (Aug. 2003)
- [9] A. Sato, E. Chishima, K. Soma and T. Mori, Shape memory effect in $\gamma \rightarrow \epsilon$ transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals, *Acta Metallurgica*, Vol.30, (1982), pp.1177-1183
- [10] Cheng-Hsiu Yang, Hsin-Chih Lin, Kun-Ming Lin, Improvement of shape memory effect in Fe–Mn–Si alloy by slight tantalum addition, *Materials Science and Engineering, A* 518, (2009), pp.139-143
- [11] Harry's webhub for Artificial Muscles in Japan
- [12] 株式会社古河テクノマテリアル, <https://www.furukawa-ftm.com/nt/lib/furu-nt1.htm>
- [13] 田中喜久昭, 戸伏壽昭, 宮崎修一, 形状記憶合金の機械的性質, 養賢堂, 1993
- [14] 大方一三, 大塚和弘, 形状記憶材料-アクチュエータとしての形状記憶合金-, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.2, pp.189~192, 1995
- [15] 宮崎修一, 佐久間俊雄, 渋谷喜一, 形状記憶合金の応用展開, シーエムシー出版, 2001
- [16] Jianfeng Wan and Shipu Chen, Martensitic transformation and shape memory effect in Fe-Mn-Si based alloys, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 9, (2005), pp.303-312
- [17] N. Van Caenegem, L. Duprez, K. Verbeken, D. Segers and Y. Houbaert, Stresses related to the

shape memory effect in Fe–Mn–Si-based shape memory alloys, *Materials Science and Engineering*, A 481-482, (2008), pp.183-189

[18]株式会社アクトメント, http://www.actment.co.jp/sma_sp21.htm

[19]https://official.koganei.co.jp/product/RAG_ALL

[20] 日本ばね学会編, 丸善株式会社:ばね, 第4版(2008)pp.228-236

[21] 斉藤俊, Qiongli Ji, 後藤邦彰, 人口筋肉型アクチュエータ SMA 編み構造の力学特性, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 707(2005), pp. 219-225

[22]福嶋 雄治, 城山 魁助, 後藤 志郎, 相田 信一, 山下 武, 超弾性皿ばねおよびその製造方法, 公開特許広報(A), 特開平 7-153514(1993)

[23] 日本ばね学会編, 丸善株式会社:ばね, 第4版(2008) pp.271-279

[24] 東海バネ工業株式会社:さらばねテクニカルガイド

[25] 三田俊裕, 川島捷宏, 三角正明, 大久保雅文, TiNi 形状記憶合金のボアソン比とヤング率の電磁超音波法による測定, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 76, No. 763(2010), pp. 290-295

[26] Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., FEMAP User Guide: Version 11. 1, (2014).

[27] 株式会社日本総合研究所エンジニアリング事業本部 ,LS-DYNA 使用の手引き:2004年

[28] A. Sato, E.Chishima, K. Soma and T. Mori, Shape memory effect in $\gamma \rightleftharpoons \epsilon$ transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals, *Acta Metallurgica*, Vol.30, (1982), pp.1177-1183

[29] Cheng-Hsiu Yang, Hsin-Chih Lin, Kun-Ming Lin, Improvement of shape memory effect in Fe–Mn–Si alloy by slight tantalum addition, *Materials Science and Engineering*, A 518, (2009), pp.139-143

[30] Jianfeng Wan and Shipu Chen, Martensitic transformation and shape memory effect in Fe–Mn–Si based alloys, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 9, (2005), pp.303-312

[31] N. Van Caenegem, L. Duprez, K.Verbeken, D. Segers and Y. Houbaert, Stresses related to the shape memory effect in Fe–Mn–Si-based shape memory alloys, *Materials Science and Engineering*, A 481-482, (2008), pp.183-189

[32] H. Otsuka, H. Yamada, T. Maruyama, H. Tanahashi, S. Matsuda and M. Murakami, Effects of alloying additions on Fe-Mn-Si shape memory alloys, *ISIJ International*, Vol. 30, (1990), pp. 674–679

[33] T. Saito, C. Kapusta and A. takasaki, Synthesis and characterization of Fe–Mn–Si shape memory alloy by mechanical alloying and subsequent sintering, *Materials Science and Engineering*, A 592, (2014), pp. 88-94

[34] 日本ばね学会編, 丸善株式会社:ばね, 第4版(2008) pp.178-185

[35] 原誠之助, 菅聖治, 渡邊悟, 環境対応のエンジン機器(可変動弁システム), 環境、安全、快適を実現するオートもティブシステム開発時術, Vol. 91, No. 10(2009), pp. 764-765

謝辞

本研究および論文をまとめるにあたり、多大なるご指導ご鞭撻をいただきました川村恭己教授に心から深くお礼申し上げます。

角洋一名誉教授、岡田哲男教授にもミーティング時や日ごろから研究についてのアドバイスを頂き深くお礼申し上げます。また、学部、修士の時には現ワシントン大学の和田大志客員教授にも大変お世話になりました。実験の準備、様々な実験器具の使い方に際しまして数々のご指導をいただきました道山俊一技術長、研究に協力していただいた永田氏をはじめとする研究室の方々、知能構造システム研究グループの方々に心から感謝の意を申し上げます。