Ti-Ni 形状記憶合金を用いた皿ばね型アクチュエータの開発に関する研究

畑村 望宇^{*1}, 和田 大志^{*2}, 川村 恭己^{*3}, 吉平 悠紀^{*1}, 岩橋 佑^{*4}, 畑村 耕一^{*5}

A study on disc spring actuator made from Ti-Ni shape memory alloy

Miu HATAMURA^{*1}, Taishi WADA^{*2}, Yasumi KAWAMURA^{*3},
Yuki YOSHIHARA^{*1}, Yu IWAHASHI^{*4} and Koich HATAMURA^{*5}

^{*1} Graduate School of Engineering, Yokohama National University
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan

^{*2} Department of Mechanical Engineering, University of Washington
Box 352600, Seattle, WA 98195, USA

^{*3} Faculty of Engineering, Yokohama National University
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan

^{*4} College of Engineering Science, Yokohama National University
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan

^{*5} Hatamura Engine Research Office Ltd.
2-13-20 Danbara-Yamasaki, Minami-ku, Hiroshima 732-0819, Japan

Received: 7 July 2016; Accepted: 19 December 2016

Abstract

With recent developments in the technology of intelligent materials, including shape memory alloys that deform autonomously depending on changes in the environment, such as temperature, it is expected that next-generation actuators that are simple, lightweight, and compact will also be developed. Consequently, in this paper, we investigated the disc spring type actuator made of Ti-Ni shape memory alloy (SMA), which is more compact than the conventional SMA coil spring type actuator. Firstly, prototype SMA disc springs were made from a thin SMA plate by metal stamping and shape-memory treatment. Secondly, we measured load-displacement curve of this prototype at both high and low temperatures. Thirdly, from the experimental results, the difference between displacements at low and high temperatures was used to estimate the performance (output displacement) of the SMA disc spring. The observations revealed that output displacement rate of the SMA disc spring was greater than 50% when the load was 30N. Compared to the coil spring, a similar effect would be obtained in approximately 37% of the space by the SMA disc spring. Finally, we conducted a finite element analysis of the SMA disc spring using a non-linear finite element analysis program, LS-DYNA. The validity of the analysis procedure was confirmed by comparing the analysis results with the experimental results.

Key words : Shape memory alloy, Disc spring, Actuator, Finite element analysis, LS-DYNA

1. 序 論

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(宮崎 2012)。

SMA の形状記憶効果は 1959 年に Ti-Ni SMA において発見され、これまで様々な研究が行われてきた。1970 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(Wu and Schetky, 2000)。SMA が発見されてか

No.16-00017 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00017], J-STAGE Advance Publication date : 28 December, 2016

^{*1} 横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

^{*2} 正員, University of Washington, Department of Mechanical Engineering (Box 352600, Seattle, WA 98195, USA)

^{*3} 正員, 横浜国立大学大学院 工学研究院

^{*4} 横浜国立大学 理工学部

^{*5} 正員, (株)畑村エンジン研究事務所 (〒732-0819 広島県広島市南区段原山崎 2-13-20)

E-mail of corresponding author: hatamura-miu-hz@ynu.jp

ら半世紀以上がたつ現在も SMA を用いたアクチュエータの開発は盛んに行なわれており, SMA の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様々な分野で実用が進んでいる(Machado and Savi, 2003) (Wu and Schetky, 2000).

SMA の利点として, 単位体積及び単位質量当りに発生できる力学的エネルギーが極めて高いことが挙げられる. 一方, 大きな欠点として, 回復ひずみが 5%程度と小さいことが挙げられる. その欠点を克服する手法として, コイル状に加工するという手法があり, この手法を用いて, 形状記憶合金のアクチュエータは, 幅広く実用化されるようになった(Jani et al., 2014) (Stoeckel, 1990). しかし, コイルばねは弾性ひずみ 0.1%程度の通常材料において大きなひずみを得るための構造であり, 回復ひずみが 5%もの Ti-Ni SMA でコイルばねを設計するとひずみばかり大きくなり, 出力荷重が小さいので無駄が多い. そこで本研究では Ti-Ni SMA を皿ばねの形状にすることを考えた. 皿ばねは, ひずみは大きくないが力が大きいという構造的特徴を有する. したがって, ひずみの大きい Ti-Ni SMA の材料特性と, 皿ばねの構造特性を組み合わせることにより, 両者の良い特性を併せ持つ設計にすることができると考えた. 更には, 皿ばねにはコンパクトで大きな荷重が得られるという特性がある. すなわち, 小型化できるということは Ti-Ni SMA の使用量が少なくなり, コスト面での利点もあると考えられる.

本研究では, まず第一に Ti-Ni SMA を用いた皿ばね型アクチュエータを製作し, 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. また第2に, 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討する. これらの考察により, SMA 皿ばねアクチュエータの有効性を検証することが本研究の目的である.

2. 皿ばねの特徴

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. 図 1(a)に, 皿ばねを真横から見た際の断面形状と諸寸法を示す. ここで, D は皿ばねの外径, d は内径, t は板厚, h は有効高さを示す. また, 図 1(b)に示すように荷重(P)が作用した際の皿ばねのたわみ量を δ とする. 皿ばねの最も象徴的な特性の一つは, 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 400N, 同じたわみ 7.2mm のばね性能を考えた時, 図 2 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(東海バネ工業株式会社, 2014).

Fig. 1 Dimensions of the disc spring.

Fig. 2 Illustrations indicating differences between the disc and compression coil springs.

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(式(1)). (日本ばね学会, 2008)

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

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比を表す。また、 α は直径比、 C_1 は荷重係数を表し、それぞれ式(2)、式(3)のようになる。

$$\alpha = \frac{D}{d} \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{\alpha-1}{\alpha} \right)^2}{\frac{\alpha+1}{\alpha-1} - \frac{2}{\ln \alpha}} \quad (3)$$

なお、アルメン-ラスロの近似式は、次のような仮定のもとに導入される。

- (1) 軸対称問題として扱う。したがって偏荷重が作用するような場合は扱えない。
- (2) 中立点 (図 3 の点 O) を中心に断面は形状を変えることなく剛体回転する (Almen and Lazslo, 1936)。

Fig. 3 Cross section of a disc spring illustrating the deformation mode.
O is a neutral point of the unilateral cross section.

Fig. 4 Curve indicating the dependence of load-deflection ratio on h/t (h : effective height, t : thickness).

Fig. 5 Comparison of load-deflection relationship for series and parallel disc springs.

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(式(1)), 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 4 に、 h/t の違いによる荷重特性の違いを示す。ここで図の横軸は、たわみ比(δ/h) (荷重負荷時のたわみ(δ)を皿ばねの有効高さ(h)(図 1 参照)で除した無次元量)であり、たわみの大きさの程度を表している。また縦軸は、皿ばねにかかる荷重(P)を皿ばねが圧縮によりたわみきった状態での荷重($P(\delta=h)$)で除した無次元量であり、荷重の大きさを表している。 $h/t=0.4$ 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、たわみきる前に極大点に向かえ、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 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に反比例し同じ荷重をかけた場合でもたわみは小さくなる。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、ばねの重ね合わせ枚数に比例したわみは大きくなる。

3. SMA 皿ばね

3・1 Ti-Ni SMA

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 TiNi SMA(Ti-49.4 at%)の平板(板厚 0.6mm 幅 36mm 長さ 150mm)を使用した。形状記憶処理は熱処理温度 460℃で熱処理時間一時間、その後水冷による急冷を行った。室温(15℃)での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 6 に示す。図より高温時ヤング率は $E_{high} = 44.2\text{GPa}$ となった。また、低温時ヤング率は 5.1 節で後述する FEM 解析において、材料特性モデルが折れ線で表現されることから、図のように $E_{low} = 9.80\text{GPa}$ を解析で用いることにした。また、以下では低温時をマルテンサイト相、高温時をオーステナイト相と定義する(岡部, 2013)。

Fig. 6 Stress-strain curve of the Ti-Ni shape memory alloy at high and low temperatures.

3・2 SMA 皿ばねの製造

製造は、まず(株)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を施した。各工程の写真を図 7 に示す。製造した SMA 皿ばねの寸法を表 1 に示す。また、挟み込みに使用した通常の皿ばねの寸法は、Type A は(D : 31.5mm, d : 16.3mm, h : 0.9mm, t : 1.2mm)、Type B は(D : 30mm, d : 15mm, h : 1.5mm, t : 0.5mm)である。変体温度 A_f は熱伝対で計測しながら観察した結果 45℃となった。

Table 1 Dimensions of the SMA disc springs.

	Type A	Type B
Diameter of outside: D	30 mm	30 mm
Diameter of inside: d	15 mm	15 mm
Effective height: h	0.76 mm	0.99 mm
Thickness: t	0.60 mm	0.60 mm
h/t	1.27	1.65
Transformation finish temperature: A_f	45 °C	45 °C

Fig. 7 Illustration of the processes of pressing the Ti-Ni shape memory alloy and fixing its shape to obtain the final product.

4. 出力変位特性測定実験

Ti-Ni 形状記憶合金皿ばねの低温時・高温時での縦弾性係数の差を利用し、その差から得られる出力変位をアクチュエータに応用する。図 8(a)に製作した Type-A の SMA 皿ばねにおいて、理論式（アルメン-ラスロの式(式(1)))により、低温時と高温時の荷重-たわみ曲線をプロットしたものを示す。低温時では縦弾性係数が低く皿ばねとして大きくたわむが(図 8(a)low temperature), 高温に加熱すると同じ荷重が加わっていても縦弾性係数の大きな上昇により皿ばねの性能が変化し(図 8(a)high temperature), 荷重を加えた状態でもたわみが元に戻る方向に変位する。その時の変化したたわみ量を出力変位(図中 Output displacement)とする。図 8(b)に、理論式に基づいた場合の荷重に対する出力変位を示す。本研究では、この出力をアクチュエータとして使用することを考えた。本章では、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するたわみ測定実験を行った。これにより、荷重たわみ曲線を実験的に求めるとともに、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実際の出力変位特性を算出する。

(a) Load-displacement curve.

(b) Output displacement.

Fig. 8 Graphical representation of the theoretical output displacement for the Type A SMA disc spring.

4・1 実験方法

たわみ測定実験では、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。この計測を低温と高温でそれぞれ実施する。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9に示す。冷却はスポットクーラーによる空冷で約 10℃で行い、加熱は工業用ドライヤーにより約 150℃まで加熱した。

Fig. 9 Schematic drawing of the experimental setup for measurement of displacement.

4・2 実験結果

図 10 に、Type A と Type B の実験結果から得られた荷重たわみ曲線と、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。理論値算出には、引張試験の結果より得られた低温時ヤング率 $E_{low} = 9.8\text{GPa}$ と高温時ヤング率 $E_{high} = 44.2\text{GPa}$ を用いた。また、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(三田他, 2010)。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.10 Load-displacement curves of the SMA disc springs at high and low temperatures for Type A and Type B.

Fig. 11 Output displacement of the SMA disc springs for Type A and Type B.

実験結果より得られたアクチュエータとしての出力変位特性を図 11 に示す. 出力変位は, 図 10 のグラフより, 同じ荷重を負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 8 参照). 図 11 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, 24N 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, 30N 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.

4・3 考察

Type A で 24N の荷重を与えた時, 0.62mm の出力変位(出力たわみ率 $\delta/(h+t)$: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. ここでは, Type B の SMA 皿ばねを例に, その性能について考察する. 具体的には, 図 2 の考察と同様に, 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 皿ばねの場合, 図 12 の左のように Type B の SMA 皿ばねを直列に 10 枚重ね合わせることでこの性能を得られる. 一方, SMA 圧縮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 とすると共に, 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. この条件のもとに設計すると, 線径 $d=5.2\text{mm}$, 自然長 $H=43\text{mm}$ となった(図 12 右). 図 12 のように, 皿ばねを用いれば, 圧縮コイルばねを用いる場合の 37%のスペースで同様の性能を得ることができる.

Fig.12 Comparison between disc spring and coil spring.

図 10 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 10 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 11 にもその影響が大きく出ており, 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「断面は形状を変えることなく剛体回転する」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たヤング率が一定であることである. 実際の SMA 皿ばねでは, 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, アルメン-ラスロの近似式ではヤング率が常に一定という仮定であるため, その違いが原因でたわみが大きくなると実験値との差が生じると考えられる.

図 10, 11 のように, Type A, Type B とともに, 最大の出力変位は低温時に有効高さまでたわみきる時の荷重近辺で得られることがわかる. ただし, 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変位特性と実測値には, 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による解析手法について検討する.

5. 有限要素法解析

本章では, LS-DYNA の陰解法モードを用いた SMA 皿ばねの性能評価のための有限要素法解析の解析手法を確立する. また, 実験と同様に低温時と高温時のたわみの差から SMA 皿ばねの出力変位特性を推測する.

5・1 モデル化

実験で用いた表 1 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(Siemens, 2014). メッシュは皿ばねの周方向に 16 分割し, そのそれぞれの部分を面方向に 20×20 , 厚さ方向に 6 分割する (図 13). 材料特性は, 低温時と高温時で分けて考える. 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(図 14). 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(図 15) (株式会社日本総合研究所, 2004) (Nagraj et al., 2012, 2014). 各材料特性を設定する際に用いた材料定数の値は図 14 と図 15 内に示してある. これらの値は実験結果を参考に設定した.

Fig.13 An FEM model of the disc spring.

Fig.14 Material constant of elastic model at low temperature.

Fig.15 Material constant of superelastic model at high temperature.

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(上下方向)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, 上面の節点は平面方向において拘束し, 下面には実験より得られた静止摩擦係数 $\mu=0.3153$ により摩擦を作用させる.

荷重は重力と同様の方向に 1 秒間に 25N の力を内側の上部の節点のみに与える.

5・2 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 16 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 17 に示す.

5・3 考察

図 16 より, 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. 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, 前章の考察で述べたとおり, 製造した SMA 皿ばねの歪みが影響しており, 値として有効ではないと考えられるので, この急激な上昇は理想的な皿ばねの解析では再現できない. 図 17 の出力変位特性のグラフにおいても, 実験結果を再現できている. 以上より, 本研究では FEM 解析を用いた SMA 皿ばねの性能評価手法を確立できたといえる. これにより, 任意の寸法の SMA 皿ばねの性能評価が可能となった.

Fig.16 Comparison of the load-displacement curve between experimental and analysis results.

Fig.17 Comparison of output displacement between experimental and analysis results.

6. 結 論

本研究では、SMA 皿ばねの製造と出力変位特性測定実験を行った。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ヘ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変位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%以上の出力たわみ率を得られた。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た。これにより、FEM 解析を用いた SMA 皿ばねの性能評価が可能となった。今後はこの性能評価手法を用いて、皿ばねの各パラメータがアクチュエータとしての出力変位特性にどのように影響するかを検討していく。

文 献

- Alemn, J. O. and Lazlo, A. The uniform-section disc spring, Transactions of the American society of mechanical engineers, Vol. 58 (1936), pp. 305-314.
- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A. and Gibson, M. A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, Materials and design, Vol. 56 (2014), pp. 1078-1113.
- Machado, G. L. and Savi, A. M., Medical applications of shape memory alloys, Brazilian journal of medical and biological research, Vol.36, Issue 6 (2003), pp. 683-691.
- 三田俊裕, 川島捷宏, 三角正明, 大久保雅文, TiNi 形状記憶合金のポ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.
- 宮崎修一, 形状記憶合金の基礎:化学と教育, Vol.60, No.7 (2012), pp310-312.
- Nagraj, R. G., Venkatesha, C. S. and Rajeev Jain, Investigation of bird strike phenomena on shape memory alloy, Procedia materials science, Vol.5 (2014), pp. 50-59.
- Nagraj, R. G., Venkatesha, C. S. and Rajeev Jain, Numerical simulation of soft-body impact on shape memory alloys(SMA), International journal of scientific & engineering research, Vol. 3, Issue 8 (2012), 3 pages.
- 岡部洋二, セル状構造の SMA による高伸縮性と高発生力を有するリハビリ用人工筋肉の開発, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 様式 F-19 (2013).
- 岡部洋二, 形状記憶合金を用いたスマート複合材料構造生産研究, Vol.61, No.6 (2009), pp977-978.
- Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., FEMAP user guide, Version 11. 1 (2014).
- Stoeckel D., Shape memory actuators for automotive applications, Materials and design, Vol. 11, No. 6 (1990), pp. 302-307.
- 株式会社日本総合研究所, LS-DYNA 使用の手引き(2004).
- 日本ばね学会編, ばね 第4版 (2008), pp271-280, 丸善株式会社.
- 東海バネ工業株式会社, さらばねテクニカルガイダンス (2014), available from < <http://www.tokaibane.com/consulting/tech.pdf>>, (参照日 2014 年 1 月 12 日).
- Wu, M. H. and Schetky, L. M., Industrial applications for shape memory alloys, Proceedings of the conference on shape memory and superelastic technologies, Pacific grove, California (2000), pp. 171-182.

References

- Alemn, J. O. and Lazlo, A., The uniform-section disk spring, Transactions of the American society of mechanical engineers, Vol.58 (1936), pp. 305-314.

- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A. and Gibson, M. A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials and design*, Vol. 56(2014), pp. 1078-1113.
- Machado, G. L. and Savi, A. M., Medical applications of shape memory alloys, *Brazilian journal of medical and biological research*, Vol.36, Issue 6 (2003), pp. 683-691.
- Mita, T., Kawashima, K., Misumi, M. and Ohkubo, M., Poisson's ratio and young's modulus of TiNi shape memory alloy measured by electromagnetic acoustic transducer, *Transactions of the japan society of mechanical engineers, Series A*, Vol. 76, No. 763(2010), pp. 290-295 (in Japanese).
- Miyazaki, S., The foundations of shape-memory alloy, *Chemistry and education*, Vol.60, No. 7 (2012), pp. 310-312 (in Japanese).
- Nagraj, R. G., Venkatesha, C. S. and Rajeev Jain, Investigation of bird strike phenomena on shape memory alloy, *Procedia materials science*, Vol.5 (2014), pp. 50-59.
- Nagraj, R. G., Venkatesha, C. S. and Rajeev Jain, Numerical simulation of soft-body impact on shape memory alloys(SMA), *International journal of scientific & engineering research*, Vol. 3, Issue 8 (2012), 3 pages.
- Okabe, Y., Development of artificial muscle for rehabilitation from SMA cell structures with high stretch properties and high generative force, *A scientific research funds furtherance business results of research report, Style F-19* (2013) (in Japanese).
- Okabe, Y., Smart composite material structure using the shape-memory alloy, *A production study*, Vol.61, No.6 (2009), pp. 977-978 (in Japanese).
- Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., *FEMAP user guide*, Version 11. 1 (2014) (in Japanese).
- Stoeckel, D., Shape memory actuators for automotive applications, *Materials and design*, Vol. 11, No. 6 (1990), pp. 302-307.
- The Japan Research Institute Ltd., *User's guide of LS-DYNA* (2004) (in Japanese).
- The japan society of spring engineers, *Spring* (The fourth edition) (2008), pp. 271-280, Maruzen Co., Ltd. (in Japanese).
- Tokai Bane Co., Ltd., *Disc spring technical guidance* (2014), available from <<http://www.tokaibane.com/consulting/tech.pdf>>, (accessed on 12 January, 2014) (in Japanese).
- Wu, M. H. and Schetky, L. M., Industrial applications for shape memory alloys, *Proceedings of the conference on shape memory and superelastic technologies*, Pacific grove, California (2000), pp. 171-182.