

## 形状記憶複合材料の2方向曲げ挙動 Two-Way Bending Behavior of Shape-Memory Composite

戸伏壽昭<sup>†</sup>, 林俊一<sup>††</sup>, 杉本義樹<sup>†††</sup>, 伊達功祐<sup>†††</sup>  
H. Tobushi<sup>†</sup>, S. Hayashi<sup>††</sup>, Y. Sugimoto<sup>†††</sup> and K. Date<sup>†††</sup>

**Abstract** The shape memory composite (SMC) with shape memory alloy (SMA) and shape memory polymer (SMP) was fabricated, and the two-way bending deformation and recovery force were investigated. The results obtained can be summarized as follows. (1) Two kinds of SMA tapes which show the shape memory effect (SME) and superelasticity (SE) were heat-treated to memorize the round shape, respectively. The shape-memorized round SMA tapes were arranged facing in the opposite directions and were sandwiched between the SMP sheets. The SMC belt can be fabricated by using the appropriate factors: the number of SMP sheets, pressing force, heating temperature and holding time. (2) The two-way bending deformation with an angle of 56 degrees in the fabricated SMC belt is observed based on the SME and SE of SMA tapes during heating and cooling. (3) If the SMC belt is heated and cooled by keeping the bent form, recovery force increases during heating and decreases during cooling based on the two-way properties of the SMC. (4) The development and application of high-functional SMCs are expected by the combination of SMA and SMP with various kinds of phase transformation temperatures, volume fractions, configurations and heating-cooling rates.

### 1. 緒言

光, 電気, 温度などの外部からの刺激にตอบสนองして種々の能動的機能を発現する材料はインテリジェント材料あるいはスマート材料と呼ばれ, その開発と応用が注目されている. インテリジェント材料には金属, セラミックス, 高分子材料などがあり, これらの材料は産業分野, 航空宇宙分野, 医療分野, 生活関連分野などの広範囲の分野で応用されている. これらの研究と応用を進展させた主な材料の一つは, 形状記憶特性を発現する形状記憶合金(shape memory alloy, 以下 SMA)<sup>1)3)</sup>であり, 形状記憶ポリマー(shape memory polymer, 以下 SMP)<sup>4)6)</sup>も形状記憶特性を発現し, 実用化されている.

SMA の形状記憶特性は温度変化により結晶構造の変化するマルテンサイト(martensite, 以下 M)変態によって生じる. SMA では8%のひずみが回復可能であり, 大きな回復応力およびエネルギーの貯蔵と散逸の特性を利用することもできる.

一方, SMP の形状記憶特性は温度変化により分子運動特性の変化するガラス転移によって生じる. SMP はシート, フィルムおよびフォーム等種々の形態で使用でき, 数百%のひずみが回復可能である. SMP の中で実用されているのはポリウレタン系 SMP である. SMA の中で, 特に TiNi SMA は疲労

強度に優れている.

SMP を SMA と比較すると軽量, 透明, 成形性に優れており, 安価である. しかし回復応力, 疲労強度などでは SMA に比べて劣る. SMA と SMP の優れた長所を組み合わせ, 新しい機能を持たせるために, SMA と SMP を組み合わせた形状記憶複合材料(shape memory composite, 以下 SMC)の開発が期待されている. マトリックスに SMP, ファイバーに SMA を使った SMC に注目すると以下の特性が得られる. SMA は高温で高い回復応力を示し, 低温で残留する変形が加熱により消滅し元の形状に戻る. しかし, 低温では変態応力および弾性係数が小さく, 大きな負荷を保持することは難しい. これに対し, SMP は高温では軟らかく, 変形を与えても元の形状に戻る. 低温では弾性係数が大きくなり, 変形した形状を保持し, 大きな負荷を受けることができる. したがって, SMA と SMP の双方の特性を組み合わせた複合材料を考えると, 高温では大きな回復力が生じ, 変形した形状が元に戻り, 低温では変形した形状をそのまま保持し, 大きな負荷を受けることが可能になる. また, SMP を SMA と組合せることにより応答速度が高く, 形状の回復特性が正確に規定できる形状記憶素子を開発することができる<sup>7)</sup>.

本研究では温度変化によって2つの方向に動作可能な2方向性を持つ SMC の作製と力学的特性を検討する. このような複合材料の開発を進めるための第一段階として, 2種類の SMA と SMP を組合せた SMC ベルトを試作し, 2方向性を持つ SMC の作製方法の確立および基本的な力学的特性を調べ

<sup>†</sup> 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

<sup>††</sup> (株) SMP テクノロジーズ (東京都渋谷区)

<sup>†††</sup> 愛知工業大学 大学院 (豊田市)

る. SMC ベルトの作動特性に関しては, 実用上多く使用されている曲げ変形に関して, 3 点曲げの状態加熱・冷却により, 2 方向特性に伴う回復力の挙動について検討する.

## 2. SMA と SMP による複合材料の特性

SMA と SMP の基本的な変形特性と SMC の特性を検討する為に, Fig.1(a)と(b)にそれぞれ SMA, SMP および鋼の弾性係数と降伏応力の温度依存性を示す. Fig.1 は片対数グラフで表している.

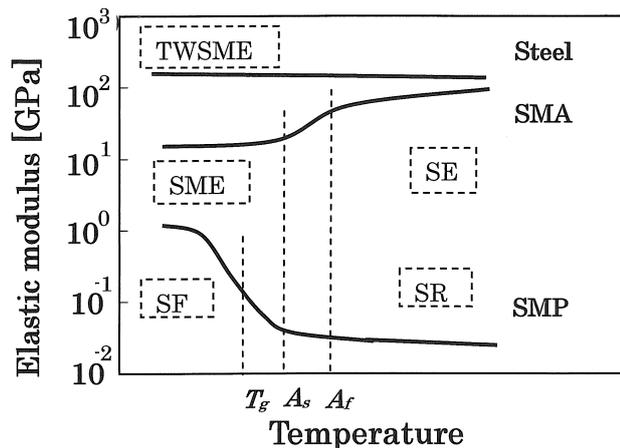
図において, 温度軸の  $A_s$ ,  $A_f$  および  $T_g$  はそれぞれ SMA の逆(オーステナイト)変態の開始と終了の温度および SMP のガラス転移温度を示す.  $\sigma_M$  と  $\sigma_A$  はそれぞれ SMA の応力誘起の M 変態応力および逆変態応力を示す.

Fig.1 に示されるように, SMA では弾性係数および  $\sigma_M$  は  $A_s$  点以下の温度では小さく,  $A_f$  点以上の温度では大きい. また,  $A_f$  点以上では逆変態応力  $\sigma_A$  が現れる.  $\sigma_M$  および  $\sigma_A$  は温度に比

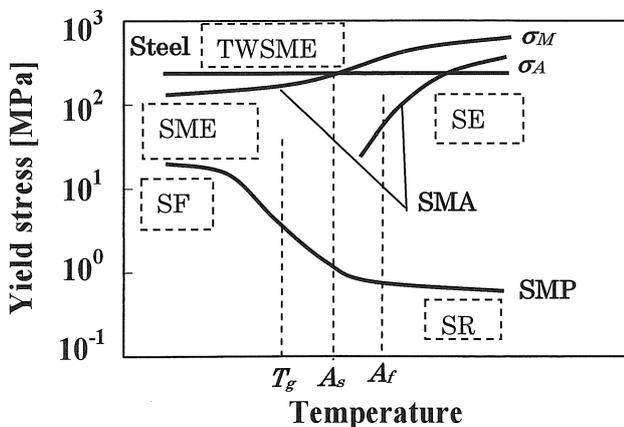
例して増加する. これらの特性に基づいて,  $A_f$  点以下で変形した場合には, 除荷後に残留ひずみが現れ, この残留ひずみは無負荷の下での加熱で消滅し, 形状記憶効果 (shape memory effect, 以下 SME) が現れる.  $A_f$  点以上で変形した場合には, 除荷のみで逆変態によりひずみが回復し, 超弾性 (superelasticity, 以下 SE) が現れる. これに対し, SMA が多く実用されている温度範囲 (273K~373K) においては, 鋼の弾性係数と降伏応力はほぼ一定である. したがって, 鋼をバイアス素子の材料として用い, SMA 素子と組合せ, 逆変態領域の上下の温度で使用すれば, 加熱・冷却で 2 方向形状記憶効果 (two-way shape memory effect, 以下 TWSME) を利用することができる.

一方, SMP では弾性係数および降伏応力がガラス転移温度  $T_g$  以下の温度では大きく,  $T_g$  以上の温度では小さい. したがって,  $T_g$  以上の温度では容易に変形し, 変形した形状を保持したまま  $T_g$  以下の温度まで冷却すると, 変形した形状が固定され, 大きな負荷を受けることができる. この特性は形状固定性 (shape fixity, 以下 SF) と呼ばれる. 変形した形状が固定された材料を無負荷の下で  $T_g$  以上の温度まで加熱すると初期の形状に戻る. この特性は形状回復性 (shape recovery, 以下 SR) と呼ばれている.

上述のように, SMA, SMP および鋼の弾性係数と降伏応力の温度依存性は著しく異なる. したがって, これらの材料を適切に組み合わせた複合材料を作製すれば, 従来の材料では得られない機能を発揮する SMC が開発できる. 例えば, SMP 素子単体では高温で剛性が低いけれども, SMA と組合せた SMC 素子では高温でも高い剛性を得ることができ, 同時に大きな回復力も得ることができる. 同様に SMA 素子単体では低温で剛性は低いが, SMP と組合せた SMC 素子では低温でも高い剛性を得ることができる.



(a) Elastic modulus



(b) Yield stress

Fig.1 Dependence of elastic modulus and yield stress on temperature for SMA, SMP and steel

## 3. 2 方向動作の SMC ベルトの作製

### 3・1 供試材

SMA には室温で SME を示す薄帯板と SE を示す薄帯板の 2 種類の SMA 薄帯板を用いた. SME を示す薄帯板は (株) 古河テクノマテリアル製の TiNi SMA 薄帯板 (NT-M) を用いた. 幅は 5mm, 厚さは 0.25mm であった. SE を示す薄帯板は (株) 吉見製作所製の TiNi SMA 薄帯板であり, 幅は 2.5mm, 厚さは 0.3mm であった. 各 SMA 薄帯板は内径 16mm の円環固定治具の内側にそって巻きつけ, 外径が 16mm の円形になる形状記憶熱処理を施した. SMA の逆変態温度は次の通りである. SME を示す薄帯板の逆変態終了温度  $A_{fSME}$  は 347K, SE を示

す薄帯板の逆変態終了温度  $A_{fSE}$  は 317K であった。SMP には (株) ディアプレックス製のポリウレタン系 SMP シート (MM6520) を使用した。厚さは 0.25mm であり、ガラス転移温度  $T_g$  は 338K であった。

### 3・2 SMC ベルトの構造と変形特性

2 種類の SMA と SMP を使用し、長さ 60mm、幅 10mm、厚さ 0.75mm の SMC ベルトを作製した。作製した SMC では、マトリックスには SMP シートを使用し、ファイバーには SMA 薄帯板を使用した。SMA 薄帯板には形状記憶効果を示す長さ 50mm、幅 5mm、厚さ 0.25mm の帯板 (SME 薄帯板, SME-SMA tape) と超弾性を示す長さ 50mm、幅 2.5mm、厚さ 0.3mm の帯板 (SE 薄帯板, SE-SMA tape) の 2 種類を使用した。SMC ベルトでは母材の中心部分に 2 種類の SMA 薄帯板を埋め込んでいる。作製した SMC では SMA の断面積率が 27% である。

Fig.2 に示すように、丸形を形状記憶した SME 薄帯板と SE 薄帯板は、記憶した形状が逆向きにそる様に貼り合わせる。作製した SMC の加熱冷却での 2 方向挙動の原理を Fig.3 に示す。Fig.3 に示すように、SMC は、低温時には SE 薄帯板の回復力によって下に凸になるように (SE 薄帯板の丸記憶の方向に) 曲がり、高温時には SME 薄帯板の回復力で上に凸になるように (SME 薄帯板の丸記憶の方向に) 曲がる。

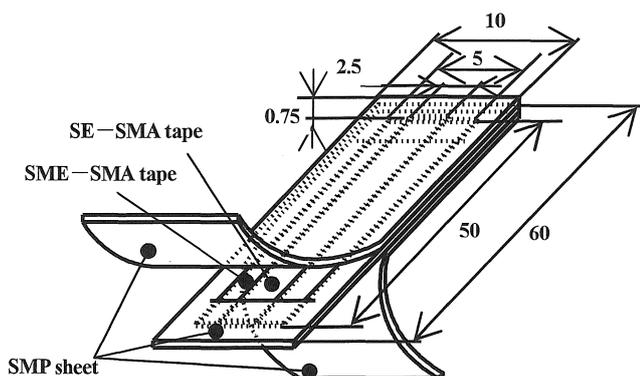


Fig.2 Structure of SMC composed of SME-SMA tape, SE-SMA

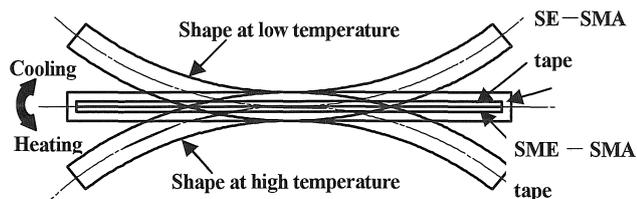


Fig.3 Principle of two-way bending behavior in SMC during heating and cooling

### 3・3 SMC ベルトの作製

最初に 1 枚の SMP シートに切り込みを設け、この切り込みに SME と SE を示す 2 種類の SMA 薄帯板 (SME-SMA tape と SE-SMA tape) を通した。この時、SME-SMA tape と SE-SMA tape とは形状記憶処理した丸形が背中合わせになるようにセットした。この 2 枚の SMA 薄帯板を通した SMP シートを上下 2 枚の SMP シートで挟んだ。これを Fig.4 に示す SMC ベルト成形用の型にセットした。成形する SMC の性能には SMP シートの枚数、加圧力、加熱温度および保持温度などが影響する。これらの因子について多くの予備実験を行い、適正な成形条件を検討した。この結果、次の条件で成形すれば気泡や隙間などが発生しない SMC ベルトが作製できることを確かめた。最初に 2 種類の SMA 薄帯板を SMP シートで挟んで型にセットした。次に上下の型をボルトによりトルク 6.78N・m で締め付けた。この型を 448K の炉中に 30min 保持し、空冷した。成形した SMC ベルトの写真を Fig.5 に示す。Fig.5 に示すように、SMA の端の部分が少し浮き上がっている。SMP シート 1 枚だけの 경우에는、加熱時に発生する SME-SMA 薄帯板の回復力で SME-SMA 薄帯板端部が突き出た。この端部の突き出しを防止するため、小さくカットした SMP シートを SME-SMA 薄帯板端部に敷いて成形した。これにより SME-SMA 薄帯板端部の加熱時の突き出しを防止できた。

## 4. SMC ベルトの 2 方向曲げ変形

### 4・1 2 方向変形挙動

作製した SMC ベルトの加熱・冷却による 2 方向曲げ変形の写真を Fig.6 に示す。加熱と冷却は 363K と 293K の間で行った。293K では SE-SMA 薄帯板に生じる力が強く、SE-SMA 薄帯板の丸記憶の方向に曲がった形状を示す。加熱すると SMP は軟らかくなり、SME-SMA 薄帯板の回復力が大きくなり、SME-SMA 薄帯板の丸記憶の方向に曲がるため、363K では平らな形状になる。その後冷却すると SME-SMA 薄帯板の回復力が小さくなり、SE-SMA 薄帯板に生じる力の方が大きくなる。この為、SMC は再び曲がった形状になる。このように、作製した SMC は加熱・冷却で  $56^\circ$  の角度をなす 2 方向曲げ変形を示す。

### 4・2 内部曲げモーメントによるたわみの評価

温度で変化する 2 方向曲げ変形挙動は SMC を構成する SE

薄帯板, SME 薄帯板および SMP シートに生じる内部曲げモーメントに基づいて現れる. 内部曲げモーメントは各構成要素の曲げ剛性に比例し, その温度依存性は次の通り評価できる. 弾性係数  $E$ , 断面二次モーメント  $I$  の帯板の曲げ剛性は  $EI$  で表される. 帯板の横断面の幅  $b$ , 高さを  $h$  とすると  $I = bh^3/12$  である.

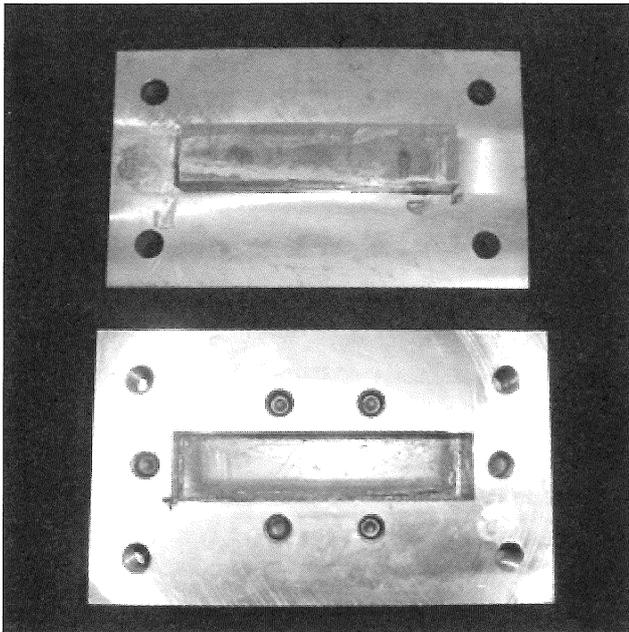
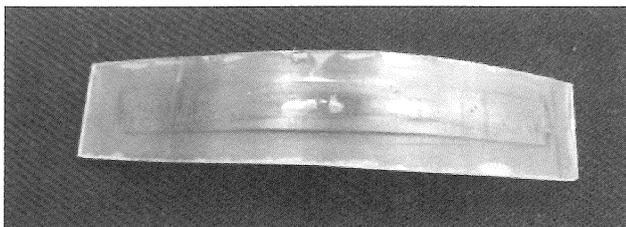
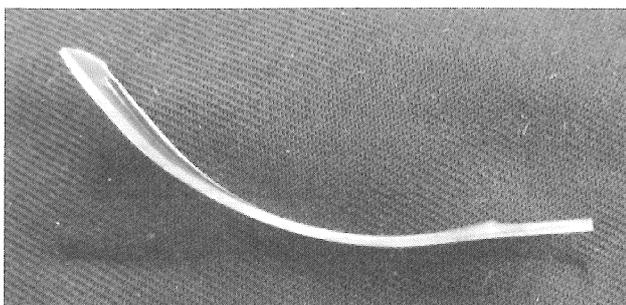


Fig.4 Photograph of the mold for fabricating the SMC belt



(a) Front view



(b) Side view

Fig.5 Photograph of the fabricated SMC belt

SMC ベルトの曲げ剛性  $E_C I_C$  は各材料の曲げ剛性の和で与えられ,

$$E_C I_C = E_{SE} I_{SE} + E_{SME} I_{SME} + E_P I_P \quad (1)$$

で表される. ここで  $E_C$ ,  $E_{SE}$ ,  $E_{SME}$ ,  $E_P$  はそれぞれ SMC, SE 薄帯板, SME 薄帯板, SMP シートの弾性係数である.  $I_C$ ,  $I_{SE}$ ,  $I_{SME}$ ,  $I_P$  は SMC, SE 薄帯板, SME 薄帯板, SMP シートの断面二次モーメントであり,

$$I_C = I_{SE} + I_{SME} + I_P \quad (2)$$

である. 外部負荷に対する SMC の曲げ剛性は各材料の曲げ剛性の和により Eq.(1)で与えられる. しかし, 無負荷の下で加熱・冷却に伴う相変態の場合, SE 薄帯板の曲げ剛性  $E_{SE} I_{SE}$  と SME 薄帯板の曲げ剛性  $E_{SME} I_{SME}$  に比例する内部曲げモーメントはそれぞれの丸記憶の方向に作用し, SMP シートの曲げ剛性  $E_P I_P$  に比例する内部曲げモーメントは平面記憶の方向にたわむように作用する. 一方, Eq.(2)で求まる断面二次モーメントの評価について, SE 薄帯板と SME 薄帯板で挟んだ中央の SMP シートの厚さは SMC 成形時の加圧保持により溶けて非常に薄くなるので, SMC 横断面の中立軸は SE 薄帯板と SME 薄帯板の境界面に一致すると仮定する. これより SE 薄帯板と SME 薄帯板の断面二次モーメントはそれぞれについて  $I = bh^3/12 + A \cdot (h/2)^2 = bh^3/3$  である. ここで, 断面積  $A = bh$  である.

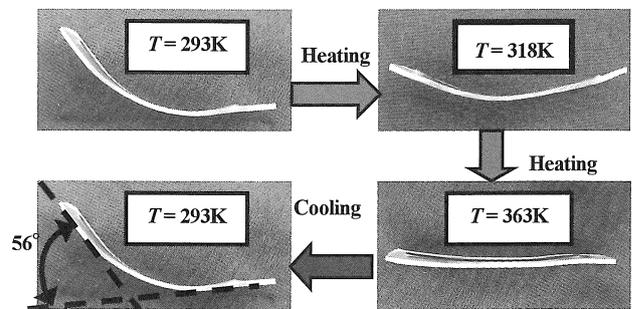


Fig.6 Photograph of the two-way bending deformation of the SMC belt during heating and cooling

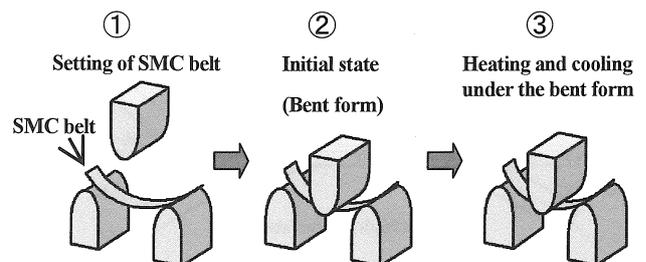


Fig.7 Experimental procedure of the three-point bending test for recovery force

TiNi SMA 帯板の弾性係数は  $T > A_f$  の温度域では 70GPa であり,  $T < A_g$  の温度域では 20GPa である. これより, SE 薄帯板の曲げ剛性  $E_{SE}I_{SE}$  は 293K 以上の温度において  $1576\text{N}\cdot\text{mm}^2$  である. また, SME 薄帯板の  $E_{SME}I_{SME}$  は 293K では  $520\text{N}\cdot\text{mm}^2$  であり, 363K では  $1842\text{N}\cdot\text{mm}^2$  である. SMP シートの弾性係数は  $T < T_g$  の温度域では 1GPa であり,  $T > T_g$  の温度域では 10MPa である. したがって, SMP シートの  $E_p I_p$  は 293K では  $301\text{N}\cdot\text{mm}^2$ , 363K では  $3\text{N}\cdot\text{mm}^2$  である. したがって, 2つの SMA 薄帯板と SMP シートの曲げ剛性に比例する内部曲げモーメントの温度依存性の違いに基づき, SMC ベルトは次の様に変形する. SMC を成形し, 金型から取り出した状態に対応する 293K では内部曲げモーメントの一番大きな SE 薄帯板の丸記憶の方向に曲がり, 363K では内部曲げモーメントの一番大きな SME 薄帯板の丸記憶の方向に曲がる.

SMC の 2 方向変形特性は SMA と SMP の構成 (配置) と分率および加熱・冷却の速度に依存する. 例えば, SMC を急速に冷却すると外側に配置されている SMP が最初に冷却され, SMP の剛性が高くなり, 高温時の形状が固定される. この為, 内部の SE 薄帯板に生じる力では大きな回復変形を得ることが出来ない. SMC の開発においては, これらの特性を明確にする必要がある.

## 5. 曲げにおける SMC ベルトの 2 方向回復力挙動

SMC の応用では曲げによる変形だけでなく, 加熱・冷却で発生する回復力を利用することが多い. 本章では試作した SMC ベルトの 2 方向回復力について, 加熱・冷却で曲げにおける回復力がどのように変化するか検討する.

### 5.1 実験方法

回復力測定のための 3 点曲げ試験の手順を模式的に Fig.7 に示す. 最初に 3 点曲げ試験機の支点にたわんだ形状の SMC ベルトを設置する①. この 3 点曲げ試験における支点間距離は 30mm である. SMC ベルトを設置後, 中央の押し込み棒の先端を SMC ベルトの中央に接触させ, その位置を一定に保つ②. SMC ベルトのたわんだ形状を保持したまま加熱と冷却を行う③.

一定に保つ SMC ベルトの形状と 3 点曲げ試験の状態を示す写真を Fig.8 に示す. 加熱冷却の速度は, 恒温槽内を 293K と 363K の間を約 1K/min で行う. 加熱過程では SMC ベルトが平面形状になろうとする時の回復力を測定し, 冷却過程では SMC が元の形状に戻ろうとする時の回復力を測定する.

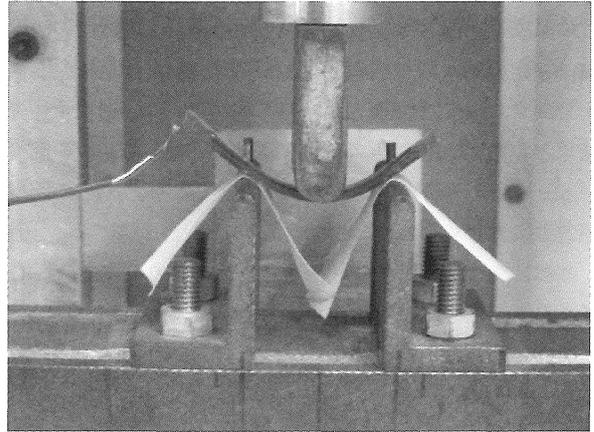


Fig.8 Photograph of the SMC belt kept in the bent form during the three-point bending test

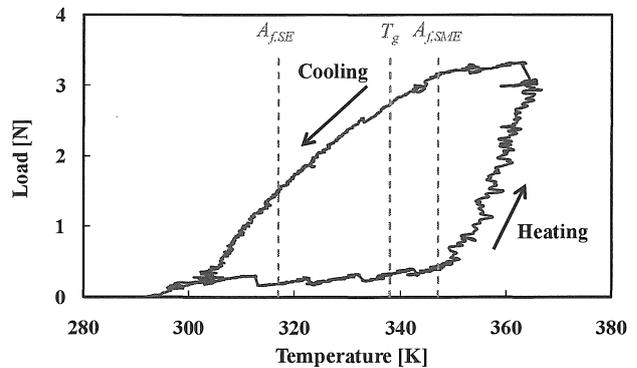


Fig.9 Relationship between recovery force and temperature during heating and cooling in the three-point bending test for the SMC belt

### 5.2 実験結果および考察

SMC ベルトの 3 点曲げ試験で得られた回復力-温度関係を Fig.9 に示す. 図中の  $A_{f,SE}$  と  $A_{f,SME}$  はそれぞれ SE-SMA 薄帯板と SME-SMA 薄帯板の逆変態終了温度を示し,  $T_g$  は SMP のガラス転位温度を表す. Fig.9 からわかるように, 回復力の挙動が加熱過程と冷却過程では異なり, ヒステリシスループを描く. 加熱過程では, SE-SMA 薄帯板の  $A_{f,SE}$  点付近の温度では SMP の  $T_g$  点より低い温度のため, SMP の弾性係数は大きく, SMP マトリックスの剛性は高い. また, SME-SMA 薄帯板の回復力は現れない. よって, SMC の回復力は小さい. SMP の  $T_g$  点付近の温度では SMP の弾性率は小さくなるが, SME-SMA 薄帯板の回復力は SE-SMA 薄帯板の回復力よりも下回るため, SMC の回復力は SE-SMA 薄帯板の  $A_{f,SE}$  点付近とほぼ同じ大きさである. SME-SMA 薄帯板の  $A_{f,SME}$  点付

近の温度で回復力は急激に増加し始める。この近傍の温度では, SME-SMA 薄帯板の回復力が SE-SMA 薄帯板の回復力を上回り, SMC の回復力が増加し始める。加熱過程全体での結果として, 350K 付近の温度で SME-SMA 薄帯板の回復力が SE-SMA 薄帯板の回復力より大きくなり, SMC の回復力が急激に大きくなる。

高温における回復力を評価すると次の通りである。SMC ベルトの 3 点曲げにおける中央のたわみ  $y$  は

$$y = \frac{Wl^3}{48E_cI_c} \quad (3)$$

であたえられる。ここで  $W$  と  $l$  は中央点に作用する荷重と支点間距離である。これにより, 高温における SMC ベルトの回復力  $W$  は

$$W = \frac{48E_cI_c}{l^3} y \quad (4)$$

で求まる。363K においてたわんだ形状の SMC ベルトに作用する内部曲げモーメントは次のようになる。SME 薄帯板と SMP シートに生じる内部曲げモーメントは平面に戻る方向に作用するのに対し, SE 薄帯板ではたわみが進展する逆方向に作用する。したがって, Eq.(1)から SMC ベルトの曲げ剛性を求めると  $E_cI_c=251\text{N}\cdot\text{mm}^2$  である。Eq.(4)において実測値  $l=25.9\text{mm}$ ,  $y=3.4\text{mm}$  を代入すると  $W=2.4\text{N}$  となる。この値は 363K における回復力 3.5N の 69% である。したがって, SMC ベルトの回復力の特性は Eq.(4)でほぼ評価できることがわかる。

冷却過程では, SME-SMA 薄帯板の  $A_{fSME}$  点付近の温度では, SME-SMA 薄帯板の回復力が SE-SMA 薄帯板の回復力を上回るので, SMC の回復力は高く, ほぼ一定である。SMP の  $T_g$  点付近の温度では, SME-SMA 薄帯板の回復力が SE-SMA 薄帯板の回復力を上回るので, SMC の回復力は依然として高い。SE-SMA 薄帯板の  $A_{fSE}$  点付近の温度では, SMP の  $T_g$  点より低い温度のため SMP の弾性係数は大きくなるが, SME-SMA 薄帯板の回復力が SE-SMA 薄帯板の回復力を依然として上回っているため, SMC の回復力は 1.5N である。冷却過程全体の結果として, SME-SMA 薄帯板の回復力が徐々に小さくなり, SMC の回復力は減少する。

加熱と冷却で SMC の回復力-温度曲線がヒステリシスループを描く現象は, SMA の回復力-温度曲線がヒステリシスループを描く現象<sup>8)</sup>と類似である。但し, SMC の回復力-温度曲線は SME-SMA 薄帯板と SE-SMA 薄帯板の  $A_f$  点および SMP の  $T_g$  に依存することに注意する必要がある。また, SMA と SMP では熱伝導率が異なる。したがって, SMC の変形と回復力の特性は, SMA ファイバーと SMP マトリッ

クスの配置と分率および加熱と冷却の速度に依存する。これらの特性および SMA と SMP の界面の強度は今後の研究課題である。

## 6. 結論

2 種類の SMA と SMP を組合せた SMC ベルトを試作し, 曲げにおける 2 方向変形および回復力の挙動を検討した。得られた主要な結果は次の通りである。

- (1) SMC ベルトのファイバーとして丸形の形状を記憶処理した SME と SE を示す 2 種類の SMA 薄帯板を用いた。2 つの SMA 薄帯板の丸形が背中合わせになるように配置し, 上下と中間に配した SMP シートにより挟み, SMC ベルトを作製した。SMP シートの枚数, 加圧力, 加熱温度, 保持温度の因子を適正に選ぶことにより, 気泡やすき間のない, SMC ベルトが作製できた。
- (2) 作製した SMC ベルトは, 加熱においては SME を示す SMA 薄帯板の丸記憶の方向にたわみ, 冷却においては SE を示す SMA 薄帯板の丸記憶の方向にたわむ。加熱と冷却により角度  $56^\circ$  の 2 方向曲げ変形を示した。
- (3) SMC ベルトの回復力に関して, 3 点曲げにおいて初期形状を保って加熱・冷却を行った。SMC の 2 方向特性に基づき, 回復力は加熱により増加し, 冷却により減少した。
- (4) SMC の特性は構成する SMA と SMP の変態温度, 体積分率, 配置, 加熱と冷却の速度に依存する。高機能な SMC の開発と応用が期待される。

本研究を行うに当たり実験に協力された愛知工業大学の学生諸君に感謝する。又, 本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金・基盤研究 (C) の補助を受けたことを記し謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Funakubo, H., ed., Shape Memory Alloys, Gordon and Breach Science Pub., (1987), pp. 1-60.
- 2) Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D. and Wayman, C. M., eds., Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann, (1990), pp. 1-35.
- 3) Otsuka, K. and Wayman, C. M., eds., Shape Memory Materials, Cambridge University Press, (1998), pp. 1-49.

- 4) Hayashi, S., Properties and Applications of Polyurethane Series Shape Memory Polymer, *Int. Progr. Urethanes*, **6** (1993), pp. 90-115.
- 5) Tobushi, H., Hashimoto, T., Ito, N., Hayashi, S. and Yamada, E., Shape Fixity and Shape Recovery in a Film of Shape Memory Polymer of Polyurethane Series, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **9** (1998), pp. 127-136.
- 6) Tobushi, H., Hayashi, S., Hoshio, K. and Ejiri, Y., Shape Recovery and Irrecoverable Strain Control in Polyurethane Shape Memory Polymer, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **9**(2008), 015009, pp. 1-7.
- 7) Tobushi, H., Hayashi, S., Hoshio, K., Makino, Y. and Miwa, N., Bending Actuation Characteristics of Shape Memory Composite with SMA and SMP, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **17** (2006), pp. 1075-1081.
- 8) Lin, P. H., Tobushi, H., Tanaka, K., LExcellent, C. and Ikai, A., Recovery Stress of TiNi Shape Memory Alloy under Constant Strain, *Arch. Mech.*, **47-2** (1995), pp. 281-293.