形状記憶複合材料の作製と 3 方向変形

戸伏 壽昭^{*1}, 林 俊一^{*2}, 宮本 浩司^{*1}, 西村 泰彦^{*1}

Fabrication and Three-way Deformation of Shape Memory Composite

Hisaaki TOBUSHI^{*1}, Shunichi HAYASHI^{*2}, Kouji MIYAMOTO^{*3} and Yasuhiko NISHIMURA^{*3}^{*1} Aichi Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota, 470-0392 Japan

In order to develop the new function of the shape memory materials, the shape memory composite (SMC) with the shape memory alloy (SMA) and the shape memory polymer (SMP) was fabricated, and the three-way bending motion 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. 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, the pressing force, the heating temperature and the holding time. (2) The three-way bending movement in the fabricated SMC belt is observed based on the SME and SE of the SMA tapes and the glass transition of the SMP sheet during heating and cooling. (3) If the SMC belt is heated and cooled by keeping the bent form, the recovery force increases during heating and decreases during cooling based on the three-way properties of the SMC. (4) The development and application of high-functional SMCs are expected by the combination of the SMA and the SMP with various kinds of phase transformation temperatures, volume fractions, configurations and heating-cooling rates.

Key Words : Shape memory alloy, Shape memory polymer, Shape memory effect, Superelasticity, Composite, Three-way, Recovery force

1. 結 言

近年、地球上のエネルギーや環境問題、資源問題を解決するために役立つ、高機能材料の開発や研究が行われている。これらの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、様々な分野での応用展開が行われている。代表的なインテリジェント材料は、形状記憶特性を発現する形状記憶合金 (shape memory alloy, 以下 SMA) や、形状記憶ポリマー (shape memory polymer, 以下 SMP) である⁽¹⁾。さらに、それぞれ単体の形状記憶材料にない、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⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

本研究では温度変化によって 3 つの方向に動作可能な 3 方向性を持つ SMC の作製と力学特性を検討する。このような複合材料の開発を進めるため、変態温度の異なる 2 種類の SMA と SMP を組合せた SMC ベルトを作製し、作製方法の確立および基本的な力学特性を調べる。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 点曲げの状態で加熱・冷却により、3 方向特性に伴う回復力の挙動およびたわみの変化について検討する。

^{*1} 正員, 愛知工業大学 工学部 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)^{*2} 株式会社 SMP テクノロジーズ^{*3} 学生員, 愛知工業大学 大学院 工学研究科

E-mail: tobushi@aitech.ac.jp

2. SMCベルトの構造と3方向動作原理

2・1 供試材

SMAには室温で形状記憶効果（以下 SME）を示す薄帯板と超弾性（以下 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（SMA tape）は（株）古河テクノマテリアル製のTiNi SMA薄帯板を用いた。幅は5mm、厚さは0.32mmであった。逆変態開始温度、終了温度 $A_{s,SMA}$, $A_{f,SMA}$ はそれぞれ324K, 342K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（SEA tape）であり、幅は2.5mm、厚さは0.25mmであった。逆変態終了温度 $A_{f,SEA}$ は309K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

Fig. 1 Arrangements of SMA, SEA and SMP tapes to laminate the SMC belt

Fig. 2 Structure of SMC belt composed of SMA, SEA, and SMP tapes

Fig. 3 Photograph of fabricating the SMC belt : (I) Upper and lower molds, (II) Setting the SMC belt on the Teflon sheet, (III) Fastening the molds after setting the SMC belt, (IV) Putting the molds with the SMC belt into the furnace

きつけ、外径が 16mm の円環形状になる形状記憶熱処理を施した。SMP には (株) SMP テクノロジーズ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。

2・2 SMCベルトの構造と作製

SMA 薄帯板、SEA 薄帯板および SMP テープを使用し、長さ 60mm、幅 10mm、厚さ 1.03mm 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 テープを使用し、ファイバーには SMA 薄帯板と SEA 薄帯板を使用した。図 1 に示すように、まず始めに、SMP テープに二つの切り込みを入れ、SMA 薄帯板と SEA 薄帯板をその切り込みに入れる。この過程において、丸形を形状記憶した SMA 薄帯板と SEA 薄帯板は、記憶した丸形状が逆向きに反る様に貼り合わせる。貼り合わせた SMA 薄帯板と SEA 薄帯板の両端を細い金属のクランプで止め、2 枚の合金薄帯板が離れずに変形する運動性を与えた。SMP テープと共に貼り合わせた 2 枚の合金薄帯板を上下から SMP テープで挟む。SMC ベルトの構造と寸法を図 2 に示す。SMC ベルトの成形過程の写真を図 3 に示す。図 3 に示すように、積層した SMC ベルトを成形用の型 (I) にセットした。SMC ベルトの接触面にはテフロンシートを用いた (II)。SMC ベルトをセットした型を締め付け (III)、炉に入れる (IV)。締め付けによる加圧の平均圧縮応力は 7.46MPa であり、448K の炉中で 60 分保持し、炉から出して室冷した。これらの成形条件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・3 3 方向曲げ挙動の原理

作製した SMC の加熱冷却における 3 方向挙動の原理を図 4 に示す。図 4 に示すように、SMC は加熱初期①～②および冷却時④には SEA 薄帯板の回復力によって下に凸になるように (SEA 薄帯板の丸記憶の方向に) 曲がり、高温時③には SMA 薄帯板の回復力で上に凸になるように (SMA 薄帯板の丸記憶の方向に) 曲がる。

3. 3 方向曲げ挙動

SMC ベルトの加熱・冷却による 3 方向曲げ変形の写真を図 5 に示す。293K①では SEA 薄帯板の丸記憶形の方向に曲がる。加熱過程の初期①～②において SMP テープは軟化し、SMC ベルトは T_g 近傍の温度で最初と同じ方向にさらに曲がる。 T_g 以上の温度②～③に加熱されると、SMP テープは容易に変形し、 $A_{f,SMA}$ 以上の温度において SMA 薄帯板の回復力が増加し、SMC ベルトは SMA 薄帯板の丸記憶形の方向に曲がる③。冷却過程③～④においては SMA 薄帯板の回復力が減少し、SEA 薄帯板の回復力の方が大きくなるために、SMC ベルトは初期形状に戻る④。

Fig. 4 Principle of three-way bending behavior in SMC belt during heating and cooling

Fig. 5 Photograph of the three-way bending deformation of the SMC belt during heating and cooling

4. SMC ベルトの回復力およびたわみ

4・1 実験方法

(1) 回復力試験

加熱冷却過程において SMC ベルトに生じる回復力を測定するため、3 点曲げ試験を行う。3 点曲げ回復力試験においては、SMC ベルトの中央点の上下面を薄い板ではみ、中央点に生じる力を測定する。実験では両支点と支点間の中央点の位置を保持し、298K と 363K の間で加熱・冷却する。加熱過程の温度 $T < T_g$ の領域では SEA 薄帯板の丸記憶の方向に曲がろうとする回復力を、 $T > A_{f,SMA}$ の温度域では SMA 薄帯板の丸記憶の方向に曲がろうとする回復力を測定する。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。

(2) たわみ試験

加熱冷却過程において SMC ベルトに生じるたわみを測定するため、3 点曲げ試験を行う。3 点曲げたわみ試験では、最初に初期形状の SMC ベルトを 3 点曲げ試験装置の支点上に置く。その後、中央の押し込み部先端が SMC ベルト中央点の表面にわずかに接触するようにする。常に 0.1N 以下の接触荷重が生じている状況を維持し、SMC ベルトを加熱冷却し、SMC ベルトの中央点の変位を測定する。

4・2 実験結果および考察

SMC ベルトの 3 点曲げによる回復力試験とたわみ試験で得られた回復力-温度関係と変位-温度関係をそれぞれ図 6 と図 7 に示す。図中の $A_{f,SEA}$ と $A_{f,SMA}$ はそれぞれ SEA 薄帯板と 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。また、①～④の記号は図 4 と図 5 において示された変形状態に対応する。図 6 と図 7 において、加熱過程の特性として、315K 付近の温度から SEA 薄帯板の回復力と変位が増加し、SMC ベルトの回復力と変位がマイナス方向に変化する①～②。340K 付近の温度から SMA 薄帯板の回復力が SEA 薄帯板の回復力より大きくなり、SMC ベルトの回復力と変位は共に急激に増加する②～③。また、冷却過程③～④全体の特性として、SMA 薄帯板の回復力が徐々に小さくなるため、SMC ベルトの回復力と変位は共に減少する。

Fig. 6 Relationship between the recovery force at the center of the SMC belt and temperature during heating and cooling in the three-point bending recovery force test

Fig. 7 Relationship between the displacement at the center of the SMC belt and temperature during heating and cooling obtained by the three-point bending deflection test

5. 結 言

SMA 薄帯板, SEA 薄帯板および SMP テープを積層し SMC ベルトを作製し, 曲げに関する 3 方向の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) 変態温度の異なる SMA 薄帯板と SEA 薄帯板の丸形記憶形状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 テープにより挟み, SMC ベルトを作製した. SMP テープの枚数, 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 ベルトが作製できる.
- (2) SMA 薄帯板, SEA 薄帯板および SMP テープの特性に基づいて加熱と冷却の過程において 3 方向の曲げ挙動が現れる.
- (3) SMC ベルトの 3 点曲げ特性に関して, 3 点の位置を保持して加熱冷却をする場合, 中央点の回復力は加熱過程初期に SEA の丸記憶方向に発生し, 加熱過程の後半に SMA の丸記憶方向に増加する. 冷却過程において回復力は減少する.
- (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. 種々の SMA と SMP の組合せで 3 次元の複雑な挙動が単純な機構の SMC で実現できるので, 高機能な SMC アクチュエータの開発と応用が期待される.

文献

- (1) 戸伏壽昭, 田中喜久昭, 堀川 宏, 松本 實, “形状記憶材料とその応用”, (2004), コロナ社.
- (2) T. Sterzl, B. Winzek, M. Mennicken, R. Nagelsdiek, H. Keul, H. Hocker and E. Quandt, “Bistable Shape Memory Thin Film Actuators”, Proc. SPIE, Vol. 5053 (2003), pp. 101-109.
- (3) J. E. Manzo and E. Garcia, “Active Rigidity Smart Joint for a Bat-Wing Micro Air Vehicle”, Proc. IMECE 2007, 43065 (2007), pp. 231-241.
- (4) 戸伏壽昭, 林 俊一, 杉本義樹, 伊達功祐, “SMA と SMP による形状記憶複合材料の作製と 2 方向変形特性”, 実験力学, Vol. 9, No. 1, (2009), pp. 27-33.