形状記憶複合帯板の 3 方向曲げ挙動*

戸伏 壽昭^{*1}, 林 俊一^{*2}, 伊達 功祐^{*3}, 西村 泰彦^{*4}

Three-Way Bending Behavior of Shape-Memory Composite Belt

Hisaaki TOBUSHI^{*1}, Shunichi HAYASHI,
Kousuke DATE and Yasuhiko NISHIMURA^{*1} Aichi Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering
1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota, 470-0392, Japan

The SMC belt composed of two kinds of SMAs with different phase transformation temperatures and SMP was fabricated and the three-way movement and recovery force in bending were investigated. The results obtained can be summarized as follows. (1) The three-way bending movement of the SMC belt was achieved during heating and cooling based on the characteristics of the SMA tapes and the SMP tape. (2) The recovery force at the center of the SMC belt decreased at first and increased thereafter during heating and decreased during cooling in the three-point holding test. (3) The development and application of multi-functional SMCs with simple structure for three-dimensional actuators are highly expected.

Key Words : Shape Memory Alloy, Shape Memory Polymer, Shape Memory Effect, Superelasticity, Composite, Three-Way, Bending, Recovery Force

1. 緒 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) であり, 形状記憶ポリマー (shape memory polymer, 以下 SMP) も広範囲の分野で実用されている. 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⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾.

本研究では温度変化によって 3 方向に動作可能な 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 の薄帯板を積層した 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.

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 (shape memory effect, 以下 SME) を示す薄帯板と超弾性 (superelasticity, 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. 逆変態の開始温度 $A_{s,SMA}$ と終了

* 原稿受付 2010 年 10 月 26 日

^{*1} 正員, 愛知工業大学 工学部 機械学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)^{*2} (株) SMP テクノロジーズ^{*3} 准員, (株) オチアイネクス^{*4} 学生員, 愛知工業大学 大学院 工学研究科

E-mail: tobushi@aitech.ac.jp

温度 $A_{f,SMA}$ はそれぞれ 324K と 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。2 種類の SMA 薄帯板は内径 16mm の円環成形用の固定治具の内側にそって巻きつけ、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

2 種類の SMA と SMP を積層し、図 1 に示す長さ 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 フィルムを使用し、ファイバーには 2 種類の SMA 薄帯板を使用した。SMC ベルト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。図 2 に示すように、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せ、SMP シートの 2 つの切り込みに通す。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 種類の SMA 薄帯板が離れずに変形する連動性を与えた。2 種類の SMA 薄帯板を SMP テープで挟み、SMC ベルト成形用の型にセットした。圧縮応力 7.46MPa で加圧し、448K の炉中で 60 分保持し、炉から出して徐冷した。この成形条件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 3 に示す。図 3 に示すように、SMC は加熱初期①～②において SMP テープが軟くなり SEA 薄帯板の内部曲げモーメント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) 曲がる。加熱後期②～③には SMA 薄帯板の内部曲げモーメントによって上に凸になるように (SMA 薄帯板の丸記憶の方向に) 曲がる。その後の冷却時③～④では、徐々に元の形状に戻る。

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 4 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 T_g 近傍の温度で SMP テープは軟化し、SMC ベルトは初期形状と同じ方向 (下に凸の方向) にさらに曲がる。 T_g 以上の温度で $A_{f,SMA}$ 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、SMA 薄帯板の内部曲げモーメントが増加し、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 薄帯板の内部曲げモーメントが減少し、SEA 薄帯板の内部曲げモーメント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. 1 Structure of SMC belt laminated with SMA tape, SEA tape and SMP tape

Fig. 2 Arrangements of the SMC belt to laminate SMA, SEA and SMP tapes

4. SMC ベルトの3方向たわみ

加熱冷却による SMC ベルトのたわみの挙動を調べる3点曲げ試験において、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、押し込み部の変位を測定する。

SMC ベルトの3点曲げ試験で得られたたわみ-温度関係を図5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3と図4において示された変形状態に対応する。図5において、加熱過程の特性として、315K 付近の温度から SEA 薄帯板に生じる内部曲げモーメントが増加し、SMC ベルトの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 薄帯板の内部曲げモーメントが SEA 薄帯板の内部曲げモーメントより大きくなり、SMC ベルトの変位は急激に増加する②～③。また、冷却過程③～④全体の特性として、SMA 薄帯板の内部曲げモーメントが徐々に小さくなるため、SMC ベルトの変位は減少する。

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

Fig. 4 Photograph of the three-way bending deformation of the SMC belt during heating and cooling

Fig. 5 Relationship between the displacement at the center of the SMC belt and temperature during heating and cooling in the three-point bending test

Fig. 6 Photograph of the holding part of the SMC belt by the three-point holding bending device in the chamber of the shape-memory characteristics testing machine at the recovery force test

Fig. 7 Relationship between recovery force at the center of the SMC belt and temperature during heating and cooling in the three-point holding bending test

5. SMC ベルトの3方向回復力

図6に示すように、加熱冷却で回復力の挙動を調べるために3点を保持する曲げ試験において、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 $T < T_g$ の温度域ではSEA薄帯板の丸記憶の方向に曲がろうとする内部曲げモーメントが生じ、 $T > A_{f,SMA}$ 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内部曲げモーメントが生じる。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。

SMCベルトの3点保持曲げ試験で得られた回復力-温度関係を図7に示す。図5と同様に、図中の $A_{f,SEA}$ 、 $A_{f,SMA}$ および T_g はそれぞれSEA薄帯板とSMA薄帯板の逆変態終了温度およびSMPのガラス転位温度を示す。①～④の記号もまた、図3と図4において示された変形状態に対応する。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薄帯板の内部曲げモーメントが増加するため、SMCベルトの回復力がマイナス方向に変化する①～②。340K付近の温度からSMA薄帯板の内部曲げモーメントがSEA薄帯板の内部曲げモーメントより大きくなり、SMCベルトの回復力は急激に増加する②～③。また、冷却過程③～④全体の特性として、SMA薄帯板の内部曲げモーメントが徐々に小さくなるため、SMCベルトの回復力は減少する。

6. 3次元多方向動作のSMCアクチュエータ

SMCの特性は、SMCを構成するSMAとSMP要素の変態温度、体積分率、配置、加熱冷却の速度などの因子に依存する。変態温度の異なる要素を連続して積層すると傾斜機能材料の様に、連続的に多段階で多方向に動作するSMCが作製できる。また、要素の配置により3次元で多方向に動作するアクチュエータが開発できる。このような3次元多方向動作のアクチュエータへの応用が期待される。

7. 結言

2種類のSMA薄帯板とSMPテープを積層した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2つのSMA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) 2種類のSMA薄帯板と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点を保持する曲げにおいて、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、加熱と冷却の速度などの因子に依存する。3次元で多方向挙動を示す高機能なSMCアクチュエータの開発と応用が期待される。

文 献

- (1) Sterzl, T., Winzek, B., Mennicken, M., Nagelsdiek, R., Keul, H., Hocker, H., and Quandt, E., "Bistable shape memory thin film actuators", *Smart Structures and Materials 2003, Proc. SPIE*, Vol. 5053 (2003), pp. 101-109.
- (2) 河井昌道, "形状記憶合金複合材料", 実験力学学会誌, Vol. 6, No. 4 (2006), pp. 363-372,.
- (3) Manzo, J.E., and Garcia, E., "Active Rigidity Smart Joint for a Bat-Wing Micro Air Vehicle", *Proc. IMECE 2007*, Vol. 43065 (2007), pp. 231-241,.
- (4) Browne et al., "Programmable Shims for Manufacturing and Assembly Lines", US7538472B2, U.S. Patent (2009).
- (5) 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.*, Vol. 17 (2006), pp. 1075-1081,.
- (6) Tobushi, H., Hayashi, S., Sugimoto, Y., and Date, K., "Two-Way Bending Properties of Shape Memory Composite with SMA and SMP", *Materials*, Vol. 2 (2009), pp. 1180-1192,.