強力大変位マイクロアクチュエータ材料

——Ti-Ni 系形状記憶合金薄膜——

宮崎修一* 石田 章**

1. はじめに

Ti-Ni 系形状記憶合金薄膜は、最も強力で大変位を発生するマイクロアクチュエータ材料として期待され、1990年から研究発表が始まった。形状記憶合金は熱の伝達を介して応答するため、バルク材料では応答性が遅いことが欠点である。しかし、材料の厚さを薄くすると冷却効率が上昇するため、応答性が飛躍的に改善できる。形状記憶合金にとって、マイクロマシンへの応用は本来の特性を遺憾なく発揮できる分野であり、マイクロマシンの開発の初期から形状記憶合金スパッタ薄膜の開発が熱望されていた。開発の当初の目標はバルク材料並の特性をスパッタ薄膜で実現することであったが、最近では薄膜固有の内部組織とそれに伴う特性改善も確認され、Ti-Ni 系形状記憶合金薄膜の機械的性質は既に実用レベルに到達している⁽¹⁾。現状における特性のチャンピオンデータを紹介すると共に応用の将来展望を行う。

2. 形状記憶特性および機械的性質

表1に示す各種チャンピオンデータについて以下に説明する。形状記憶効果の特性を評価する目安としては、回復応力、回復歪み、応答性等がある。回復応力と回復歪みはアクチュエータの仕事量に関連する。形状記憶合金の単位体積当りの仕事は、ピエゾ素子、静電力、電磁力等の他の代表的なアクチュエータ素子と比べて二桁以上大きい⁽²⁾。ほぼ完全な形状記憶効果を示す条件で、スパッタ薄膜で確認できている

表1 形状記憶合金薄膜の各種チャンピオンデータ。
(形状回復の応力と歪みが高いため、大きな仕事量が期待できる。変態温度が高く、温度ヒステリシスが小さい程、アクチュエータの応答性が高くなる。詳細は本文参照。)

特 性	チャンピオンデータ	合金組成(原子%)
形状回復応力	600 MPa	Ti-43.0Ni-6.2Cu
形状回復歪み	6%	Ti-50.5Ni
変態温度(M_s)	385 K	Ti-27.0Ni-22.0Pd
温度ヒステリシス	10 K	Ti-37.0Ni-9.5Cu
降伏応力(M 相)	600 MPa	Ti-43.0Ni-6.2Cu
降伏応力(母相)	1000 MPa	Ti-51.5Ni
破断応力	1700 MPa	Ti-51.5Ni
破断伸び	50%	Ti-49.5Ni

回復応力は 600 MPa 以上であり、回復歪みは 6% である⁽¹⁾⁽³⁾。

応答性もアクチュエータの重要な特性であり、静電力と電磁力の場合は $10^3 \sim 10^5$ Hz であり、ピエゾ素子の場合には 10^6 Hz 程度である。形状記憶合金のバルク材料では、応答性が 1 Hz 以下であるが、 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の薄膜では 10^2 Hz まで上昇し、仕事量が極めて大きいことを考慮すると固有の用途を開拓できる魅力的なアクチュエータ材料である。応答性をさらに高めるためには、変態温度ヒステリシスを小さくすればよいが、そのためには Cu の添加が有効である。Ti-Ni 二元合金のヒステリシスが約 30 K であるが、10% の Cu を Ni と置換すると 10 K にまで減少した⁽⁴⁾。また、室温で使用されることが基本であるマイクロアクチュエータの場合、変態温度そのものを上げることも冷却効率を上げ応答性を高めるために効果がある。この目的には、Pd を Ni と置換することが有効であり、変態温度を 773 K 以上にすることも可能であるが、形状記憶効果を示すことが確認されたスパッタ薄膜においては、22 原子% Pd を添加したときに M_s 点が 385 K となり二元合金よりも 50 K 高い温度が達成されている⁽⁴⁾。

降伏応力、破断伸びおよび破断応力などの機械的性質は、構造材料としての安定性の目安になる。降伏応力以下の応力の下では形状記憶効果も完全に現われるため、降伏応力は形状記憶効果の安定性の目安でもある。ほぼ完全な形状記憶効果が現われた応力が 600 MPa 以上であることから、マクロな降伏応力の最大値は 600 MPa 以上ということになる。これは、マルテンサイト相の降伏応力と考えられる。マルテンサイト変態をしない高温で変形したときには母相(B2 相)の降伏応力が測定できるが、1000 MPa 以上の値が測定されている⁽⁵⁾。破断伸びと破断応力は合金組成に強く依存するが、それぞれの組成依存性は逆の傾向を示す。すなわち、Ni 濃度が高くなると、破断伸びは減少し破断応力は増加する。破

* 筑波大学教授；物質工学系(〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)

** 金属材料技術研究所・サブグループリーダー
Microactuator Material with Strong Power and Large Actuation —TiNi-base Shape Memory Alloy Thin Films—;
Shuichi Miyazaki*, Akira Ishida**(*Institute of Materials Science, University of Tsukuba, Tsukuba. **National Research Institute for Metals, Tsukuba)

Keywords: titanium-nickel, thin film, sputter-deposition, micro-actuator, shape memory effect, martensitic transformation, titanium-nickel-copper, titanium-nickel-palladium

1998年12月24受理

断伸びの最大値は等原子比組成近傍の薄膜で50%以上が確認され、破断応力の最大値は Ti-51.5原子%Ni 薄膜で得られた 1700 MPa である⁽⁵⁾。このような機械的性質は、バルク材料の値に匹敵するものであり、スパッタ法固有の微視的欠陥に伴う脆化の問題は十分に解決できていることを示している。

3. お わ り に

本稿で述べたスパッタ薄膜の機械的性質および形状記憶特性は、既に実用材料に必要な特性を満たしている。しかし、スパッタ薄膜を用いたマイクロアクチュエータの応用例は、2~3 の試作品を除いて余り多くはない。この理由の一つは、実用に耐えるスパッタ薄膜を作製できる研究グループは世界中で大学および国立研究所の数グループだけであり、良好な Ti-Ni バルク材料を製造してきたメーカーは一社も含まれていないことが挙げられる。他の理由は、1980年代に Ti-Ni バルク材料が製造できるようになったのに呼応して、応用特許の申請が急増し、多様な実用例も作製されたバルク材料の歴史とは異なることである⁽⁶⁾。スパッタ薄膜の応用に際しては、シリコンの微細加工のパッチプロセス中に Ti-Ni 薄膜の作製を組み込まなければならないため、使用者がスパッタ薄

膜を製造できることが基本になるからである。その意味では、Ti-Ni 薄膜はまだ使用者の手元に届く状態になっていない訳であり、薄膜製造法の今後の技術移転を待つことになる。さらに、多様な形態のマイクロアクチュエータ作製のために、Ti-Ni 薄膜を組み込んだシリコン基板の微細加工法の開発が進められることが必要である。このような事情が、Ti-Ni 実用薄膜ができていても実用に直結しない理由であるが、5年程度の潜伏期間の後には確実に多様な応用が現われると期待できる。

文 献

- (1) S. Miyazaki and A. Ishida: Mater. Sci. and Eng. A, (1999), in press.
- (2) P. Krulevitch, A. P. Lee, P. B. Ramsey, J. C. Trevino, J. Hamilton and M. A. Northrup: J. Microelectromechanical systems, 5(1996), 270.
- (3) T. Matsunaga, S. Kajiwar, K. Ogawa, T. Kikuchi and S. Miyazaki: Mater. Sci. and Eng. A, (1999), in press.
- (4) S. Miyazaki, K. Nomura, A. Ishida and S. Kajiwar: J. Phys., IV France, 7(1997), C5-275.
- (5) A. Ishida, M. Sato, T. Kimura and S. Miyazaki: Phil. Mag. A, (1999), in press.
- (6) 宮崎修一: 金属, 52, 10月号(1992), 88.