

形状記憶合金シート製 MEMS 型多軸フォース/硬さ センサの作製と検出特性評価

Fabrication and characterization of multi-axis force/hardness MEMS sensor using shape memory alloy sheet

○佐藤 健太郎* 峯田 貴*

○Kentaro Sato*, Takashi Mineta*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード：MEMS, 形状記憶合金シート (Shape memory alloy sheet),
多軸フォースセンサ (multi-axis force sensor), 硬さセンサ (hardness sensor),

連絡先：〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部 理工学研究科
峯田貴, E-mail : mineta-t@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 医療分野やロボティクス分野等でマルチモーダルなセンシングが可能な触覚センサが開発されており, 作用力に加え対象物の硬さセンシングが求められる。

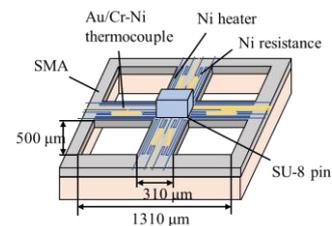
著者らは, 3 軸フォースに加え, 形状記憶合金 (SMA) の形状回復による反力で硬さも検出可能なマルチモーダル触覚センサを提案し²⁾, 50 μm の TiNi-SMA シートを用いて MEMS センサを作製したが, 特性評価には至っていない。

本研究では作製プロセスを改良して, SMA シートを用いたマルチモーダル触覚センサを作製し, 3 軸フォースおよび硬さセンシング特性を評価した。

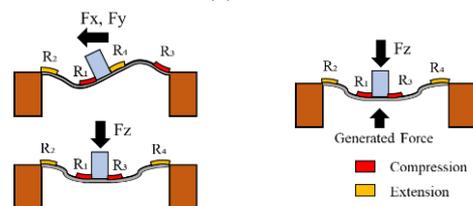
2. 触覚センサの原理と構造

センサの模式図を図 1 に示す。圧縮力およびせん断方向の力によるセンサのビームの変形によるひずみをビーム上に配置した Ni 抵抗体の電気抵抗変化より検出する。また, ビームがたわんだ状態でビームを通電加熱し, SMA の反力による変位の変化から対象物の硬さセンシングする。

センサ素子の配線レイアウトを図 2 に示す。素子のビーム上にはひずみ検出用の Ni 薄膜抵抗配線, 素子加熱用の Ni ヒーターを配置した。また, ヒーター加熱時の Ni 抵抗の温度ドリフト補正用に Au/Cr-Ni 熱電対を搭載している。Ni 抵抗は x, y, z 軸それぞれの方向のセンシングに対応したブリッジ回路をビーム内に構成している。



(a) Structure.



(b) Force sensing. (c) Hardness sensing.
Fig.1 多軸フォース/硬さセンサの構造と原理²⁾.
Structure and principle of multi-axis force and hardness sensor²⁾.

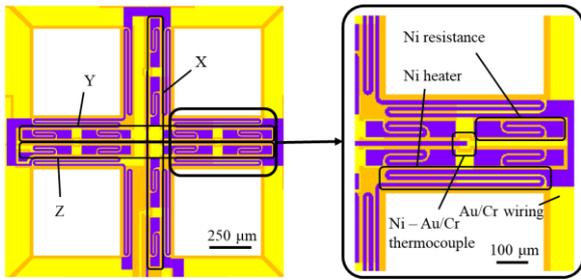


Fig. 2 センサの SMA ビーム上のパターンレイアウト²⁾.
Pattern layout on SMA beam of sensor²⁾.

3. 触覚センサの形成プロセス

用いた TiNi の 2 元系シート (J.M.社, 60 μm 厚) は, 加熱時は約 60 °C で逆マルテンサイト変態し, 冷却時は約 45 °C で R 相変態し, 約 20 °C でマルテンサイト変態することを確認した. 常温までの冷却時には十分にマルテンサイト変態せず, 加熱時には約 50 °C で逆マルテンサイト変態し, 約 65 °C で逆 R 相変態した. これは TiNi の 2 元系 SMA における典型的な変態特性である³⁾. また, 形状記憶特性を持つのは表裏から 15 μm の深さまでであった.

センサは, 図 3 に示す既報のプロセスを踏襲して²⁾, 以下の手順により作製した.

- (a) SMA 基板表面の研磨
- (b) 非感光性ポリイミド (PI) の絶縁膜パターン形成 (10 μm)
- (c) Au/Cr 薄膜配線形成 (170 nm/30 nm)
- (d) 非感光性 PI の層間絶縁膜パターン形成 (2 μm)
- (e) Ni 薄膜配線形成 (100 nm)
- (f) 非感光性 PI の絶縁保護膜パターン形成 (2 μm)
- (g) SMA 基板の貫通電解エッチング

センサ作製に用いた 60 μm 厚 TiNi の SMA シート (25 mm×25 mm, 60 μm 厚) 表面には酸化膜と 6 μm 程度の凹凸があり, 表面をアルミナ砥粒 (Φ 3 μm) を用いて機械研磨した. 基板表面には 3~4 μm 程度の凸状の Ti 析出物が出現するため, 非感光性の厚膜 PI 絶縁層 (10 μm) で被覆した.

PI 絶縁膜はレジストマスクを用いてパターンニングした. PI やレジストの収縮により SMA シートが反るため, 各リソグラフィプロセスで用いるレジストで SMA 基板を平坦な Si 基板表面に貼りつけてリソグラフィし, 現像時に Si 基板から剥離するようにした. 図 4 に形成したセンサを示す. 最終的にはビーム中央部にリソグラフィで SU-8 ピンを一括形成する構想であるが, 今回は別途作製した SU-8 ピンを顕微鏡下で接着した.

図 5 は作製したセンサをフレキシブルプリント配線 (FPC) に接合した様子である. 導電性ペースト (化研テック, CR-2800) を用いて 90 °C で 1 h 熱硬化して接合し, は 23 系統の配線中, 21 系統で良好に導通したが, ヒーター配線および Y 軸のせん断力測定用回路が断線したため, センサ全体を雰囲気加熱して評価実験を行うことにした.

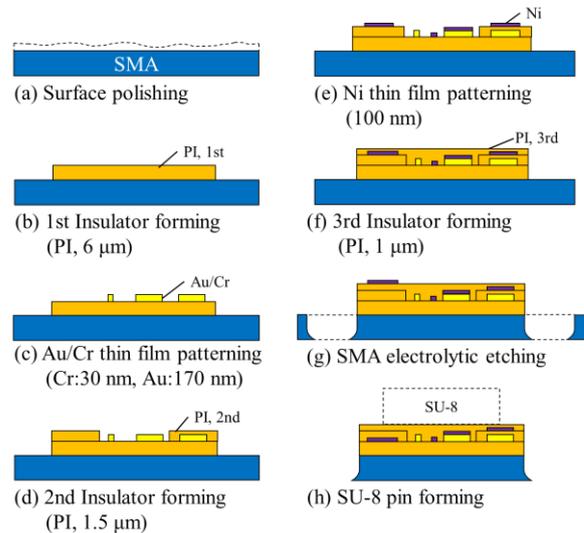


Fig. 3 SMA シートを用いたセンサの作製プロセスフロー.

Process flow of sensor fabrication from SMA sheet²⁾.

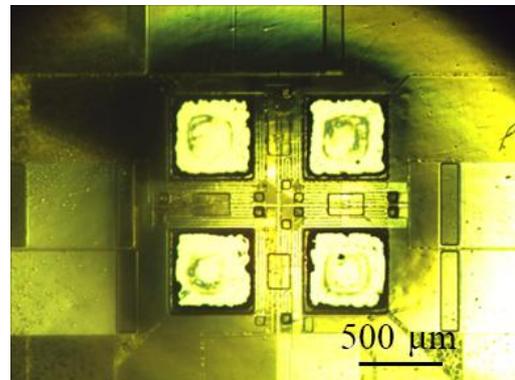


Fig. 4 作製したセンサ.
Fabricated sensor.



Fig. 5 Ag ペーストにより FPC と接合した後のセンサ.
Sensor after attaching to FPC with Ag paste.

4. センサの検出特性評価

4.1 フォースセンシング特性

作製したセンサを精密ステージに固定し、フォースゲージ (IMADA, ZTA-5N) 先端のニードルでセンサの SU-8 ピン先端を押し込み、各軸方向の力と変位とひずみセンシング用のブリッジ回路に生じる出力電圧を測定した。数 mN の反力が生じた位置を変位のゼロ点とし、変位を 5~10 μm ずつ所定の変位量まで加えた後に除荷した。完全に除荷した後は基板を取り外し、加熱して形状回復してから次のサイクルの測定を行った。

変位に対する反力およびブリッジ回路の出力の測定結果を図 6 および図 7 にそれぞれ示す。反力と変位は変位 20 μm 以内で線形に増加したが (剛性約 5 kN/m), 変位 30 μm 以上で飽和してヒステリシスが生じた。出力も同様に変位 20 μm 以下で線形に増加し、約 25 V/m の感度を示した。ゼロ点において出力のばらつきが生じたが、毎回取り外して測定した影響と思われる。

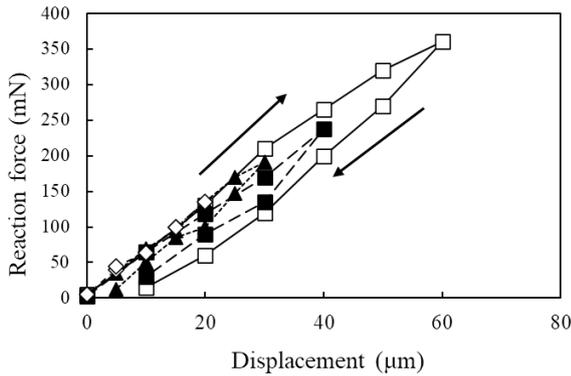


Fig. 6 測定した反力と変位の関係.
Measured relationship between reaction force and displacement.

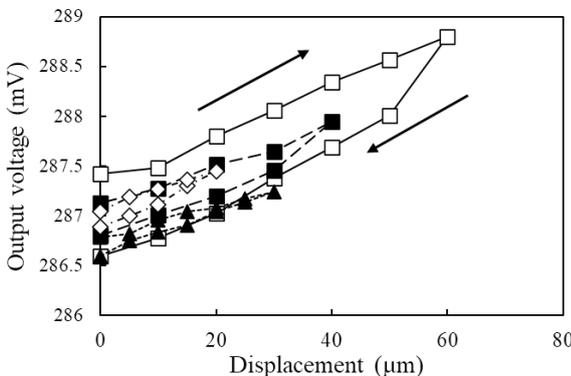


Fig. 7 測定した反力と出力の関係.
Measured relationship between output voltage and displacement.

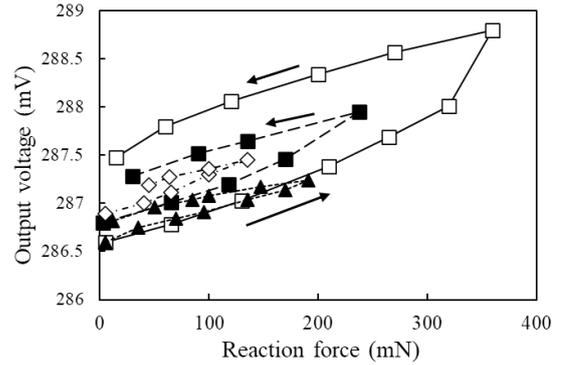


Fig. 8 垂直方向の反力と出力の関係.
Relationship between output voltage and reaction force.

反力と出力の関係を図 8 に再プロットして示す。反力 150 N 以下で線形に増加し、感度は 4 mV/N であった。出力の分解能は 0.01 mV であることから、力のセンシングの分解能は 2.5 mN である。

せん断方向 (x 方向) については変位 20 μm までは約 7 kN/m の剛性で線形に変位したが、ブリッジ回路の出力は極めて小さく、感度向上が課題である。

4.2 硬さセンシング特性

疑似的な測定対象として 2 種類の SUS 鋼板製の板ばねを用意し、(板ばね A : 720 N/m, 板ばね B : 20 N/m), 硬さの識別の可能性を調べた。板ばね B は皮膚の剛性を想定したものである⁴⁾。図 9 に示すように板ばねを機械的に固定し、室温下で一定の反力 60 mN を加え、雰囲気加熱した際の反力の変化を測定した。結果を図 10 に示す。加熱後の反力は板ばね A では 53 mN, 板ばね B では 60 mN となった。今回の SMA ビームでは、加熱時のほうが剛性は若干低くなるため、板ばね A の方が反力が低下した。わずかな変化であるが対象物の剛性の違いを識別可能であることがわかった。

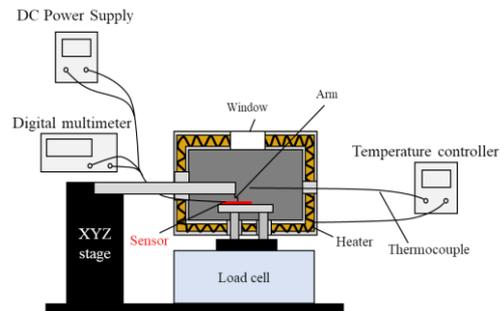


Fig. 9 雰囲気加熱による検出特性評価方法
Set up for evaluation of sensing properties under atmospheric heating⁵⁾.

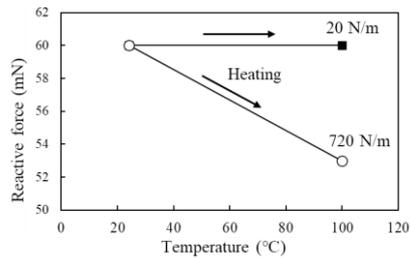


Fig. 10 SMA センサの加熱における反力の変化.
Change of reaction force of SMA sensor in heating.

5) T. Sugawara, K. Hirota, M. Watanabe, T. Mineta, E. Makino, S. Toh, T. Shibata, *Sensors and Actuators A* 130-131, pp. 461-467 (2006)

5. 結言

多軸フォースと硬さを検出する TiNi-SMA シートを用いた MEMS 型触覚センサを作製し、検出特性を評価した。

作製したセンサの垂直方向の感度は 4 mV/N で分解能は 2.5 mN 程度であり、作用力 150 mN に相当する変位 20 μm まで線形な検出が可能であった。せん断方向は良好な感度が得られなかった。雰囲気加熱時のセンサ素子の剛性センシングは感度が低いものの、ある程度の識別は可能であることがわかった。

今後はシート内部まで熱処理して SMA シートの反力を増大し、硬さ検出の分解能を向上し、また、内蔵ヒーター配線による SMA ビームの加熱と、せん断力の検出も図っていく。

謝辞

本研究の一部は科研費基礎研究 (B) 課題番号 23H01371 により行われた。

SMA シートの変態挙動評価は山形大学工学部有機材料システム研究科の西岡教授にご指導いただいた。

参考文献

- 1) Y. Hasegawa, M. Shikida, T. Shimizu, T. Miyaji, H. Sasaki, K. Sato, K. Itoigawa, *Sensors and Actuators A*, Vol. 114, pp. 141-146 (2004)
- 2) 佐藤健太郎, 峯田貴, 電気学会 MAG/MSS/BMS 合同研究会, MSS-23-053, pp.1-3 (2023)
- 3) S. Miyazaki, A. Ishida, *Materials Science and Eng. A* 273-275, pp. 106-133 (1999)
- 4) 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿, “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係”, 日本機械学会論文集 (C 編), 63 巻, 607 号, pp. 881-888 (1997)