

マイクロ単結晶 Si 薄膜の高温クリープ成形技術による

低侵襲手術用三次元ドーム型触覚センサの開発

神戸大学 大学院工学研究科

教授 磯野 吉正

(平成 27 年度 一般研究助成 AF-2015012)

キーワード：単結晶シリコン薄膜、高温パンチクリープ、触覚センサ

1. 研究の目的と背景

カテーテルによって狭窄血管をバルーンやステントで拡張治療するといった、超小型医療機器による低侵襲手術が広く普及している。しかしながら、カテーテル操作の際は、体外からのガイドワイヤの押し出し、引き抜き、あるいは捻り操作のみで複雑に入り組んだ細い血管内を通過させるため、熟練した医師でさえも血管を突き破る事故が発生している。このため、安全性・確実性の高い低侵襲手術をするには、ガイドワイヤ先端での負荷状況を検知しながら手術できるシステムの構築が強く望まれており、ガイドワイヤ先端に取り付け可能な極小 MEMS 触覚センサの開発が期待されている。

一般に、MEMS 触覚センサは Si 基板上に作製されるため^{1,2)}、半球形状したガイドワイヤ先端には直接設置することは困難である。このため、実用化された MEMS 触覚センサが取り付けられた低侵襲性医療機器は、これまでのところ見当たらない。そこで本研究では、MEMS 技術と高温クリープ成形加工とを融合した Si 薄膜の 3 次元立体成形技術の新開発することで、図 1 に示すような、ガイドワイヤ先端に設置可能な低侵襲手術用単結晶 Si 薄膜製ドーム型マイクロ触覚センサの開発を試みる。具体的には、単結晶 Si 構造体の極小化に伴って顕著に現れる高温クリープ変形挙動の特異性を積極的に活用して、既存の MEMS 技術では困難であった単結晶 Si 薄膜の 3 次元成形加工に挑戦し^{3,4)}、低侵襲手術用マイクロ触覚センサの新開発に応用する。とくに、同センサの力覚検知素子としてボロン不純物ドーピングによる半導体ピエゾ抵抗素子を採用することで、高温クリープ成形工程と半導体不純物拡散工程とを同時に実施できる技術の確立を図る。ここで、不純物ドーピングにおける拡散工程は、不純物濃度と拡散深さが温度と時間に依存し、他方、高温クリープ成形による Si 薄膜の変形量は Si 薄膜の形状寸法、負荷応力、温度、および時間に依存する。このため、本研究では、上記成形工程と拡散工程における温度と時間を共通パラメータにして、同時にプロセスが実行できる技術を確立する。

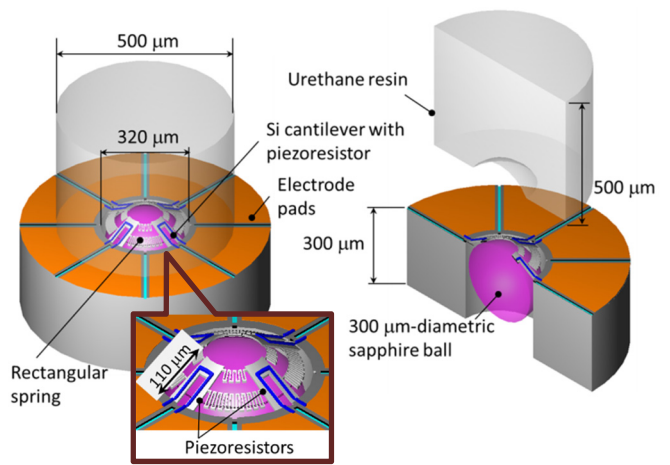


図 1 Si 薄膜製ドーム型マイクロ触覚センサの模式図

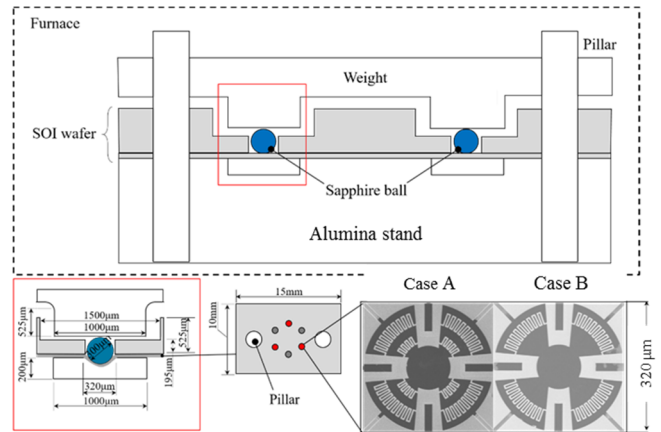


図 2 高温パンチクリープ試験の概略図

2. 高温クリープ成形加工法

単結晶 Si 薄膜の高温クリープ変形に際しては、高温パンチクリープ成形技術を採用した⁵⁾。図 2 に高温パンチクリープ実験の概観図と Si 薄膜試料を示す。同図において、高温パンチクリープ実験装置は、Si 薄膜試料となる活性層厚さ 5 μm の(100)表面を有する SOI ウエハ、アルミナ製支持台、直径 300 μm のサファイア球、負荷用アルミナプレ

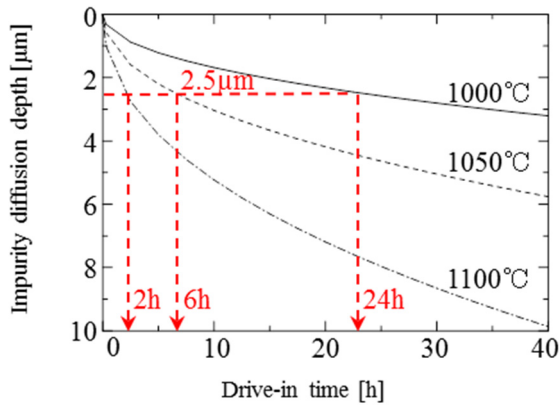


図3 各温度におけるボロン拡散深さと時間の関係

ート、および位置決め用ピラーから構成されている。ここで、サファイア球はパンチ成形用圧子として用いる。SOI ウエハは、サファイア球、ピラー、および負荷用プレートの設置位置が容易に決められるように、予め深堀ドライエッチングにより形状加工されている。さらに、SOI ウエハの活性層である単結晶 Si 薄膜領域には、後述する成形シミュレーションで予測される成型後変形量に基づいて決定された 2 次元パターンが、ドライエッチング加工によって形成されている。なお、本研究のパンチクリープ成形で用いる Si 薄膜は、直径 320 μm の円形薄膜である。

高温パンチクリープ成形条件は、Si 薄膜厚さと、不純物ドーピング時の拡散工程における温度および時間を勘案して決定した。図 3 に、各温度でのボロン拡散深さと拡散時間との関係を示す。SOI ウエハ活性層である Si 薄膜の厚さが 5 μm であることから、その半分である 2.5 μm をボロン拡散深さと設定した場合、拡散時間は 24 時間@1000 $^{\circ}\text{C}$ 、6 時間@1050 $^{\circ}\text{C}$ 、および 2 時間@1100 $^{\circ}\text{C}$ となる。本研究では、上記の温度、時間において高温パンチクリープ実験を実施した結果、センサ作製に必要なクリープ変形量が得られた 6 時間@1050 $^{\circ}\text{C}$ を採用した。

3. 高温パンチクリープ成形シミュレーション

3.1 逆解析による Si 薄膜の高温クリープ特性の解明

既に図 2 で示したように、高温パンチクリープ成形前の Si 薄膜には 2 次元パターンが形成されている。これは、薄膜パターン形状によって、高温パンチクリープ成形時の薄膜内の応力分布を変化させることができ、結果として Si 薄膜の面外方向変形量を調整できるためである。本研究では、有限要素法を用いた高温クリープ成形シミュレーションによってフィージビリティスタディを実行し、3 次元触覚センサに適したパターン形状を決定する。ただし、有限要素によるクリープ解析を実施するには、高温下でのマイクロスケール単結晶 Si のクリープ特性を予め解明しておく必要がある^{6),7)}。

本研究では、センサ設計のための成形シミュレーションに先立ち、高温パンチクリープ成形実験と有限要素シミュレーションとの比較に基づく逆解析によって、マイクロ

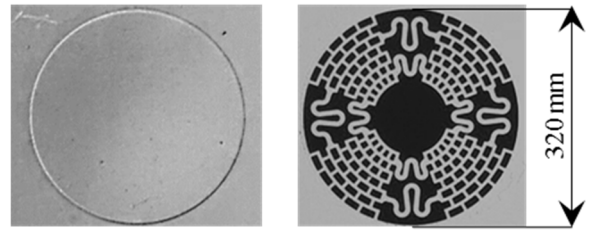


図4 逆解析用高温パンチクリープ実験に用いた 2 種類の単結晶 Si 薄膜

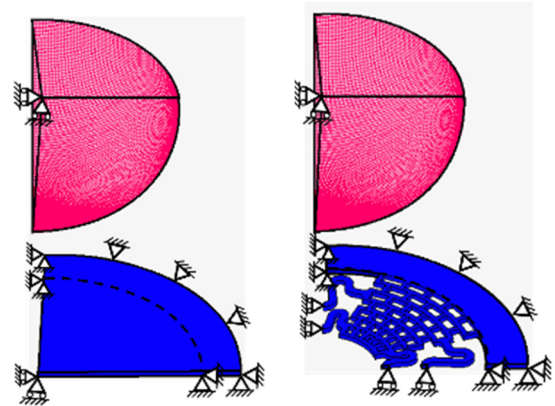


図5 逆解析用有限要素パンチクリープ成形シミュレーションモデル

ケール Si 薄膜の高温クリープ特性を定量評価した。ここでは、簡単のため Si 薄膜を等方性材料と仮定するとともに、クリープ構成式に次式の Norton 則を採用し、同式中のクリープ定数 α およびクリープ指数 β を定量的に求めた。

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^{\beta} \exp(-Q/K_{\text{B}}T) = \alpha\sigma^{\beta} \quad (1)$$

ここで、

$$\alpha = A \exp(-Q/K_{\text{B}}T) \quad (2)$$

図 4 に、逆解析のためのパンチクリープ成形実験に用いた 2 種類の単結晶 Si 薄膜パターン試料を示す。2 種類の試料を用いるのは、2 つの異なる応力レベルでクリープ実験を実施するためである。薄膜試料は、(100)表面を持つ厚さ 5 μm 、直径 320 μm の円形プレートと網状パターンプレートである。成形実験は温度 1050 $^{\circ}\text{C}$ 、荷重 4.6mN、保持時間を 8 時間とした。図示は省略するが、実験の結果、円形プレートおよび網状パターン薄膜の中央部の最大変位量は、それぞれ 5.1 μm および 40 μm であった。一方、図 5 に 2 種類の Si 薄膜に対する有限要素モデルを示す。有限要素シミュレーションは、パンチクリープ成形実験で得られた円形プレートおよび網状パターン薄膜中央部の変位量がシミュレーション結果と一致するように、クリープ定数 α および同指数 β を変化させながら実施した。

実験で得られた薄膜中央部の変位量を満たすシミュレーションでの α と β の組み合わせを、図 6 の応力-クリープ歪み速度線図上に示す。ここで、同図中の各直線の切片と傾きが、クリープ定数 α および同指数 β をそれぞれ表して

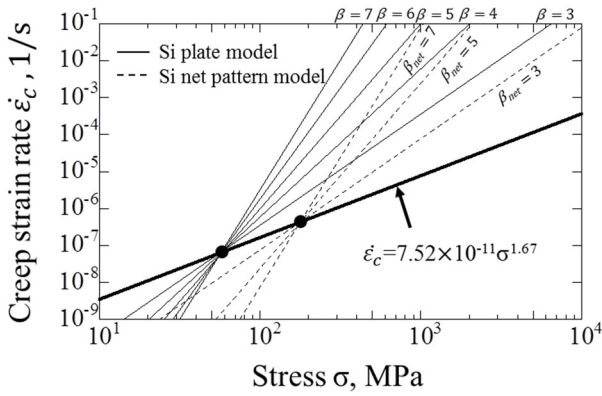
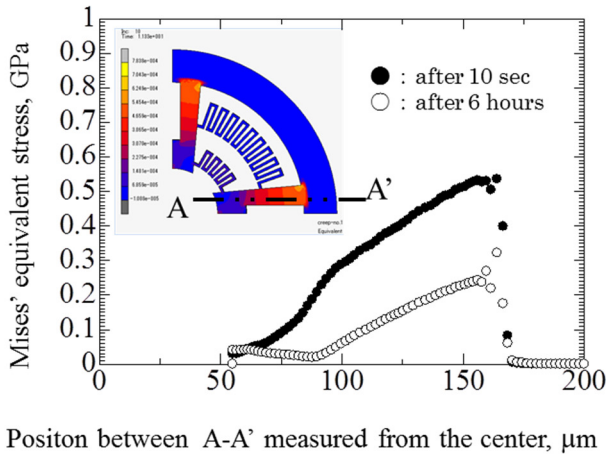
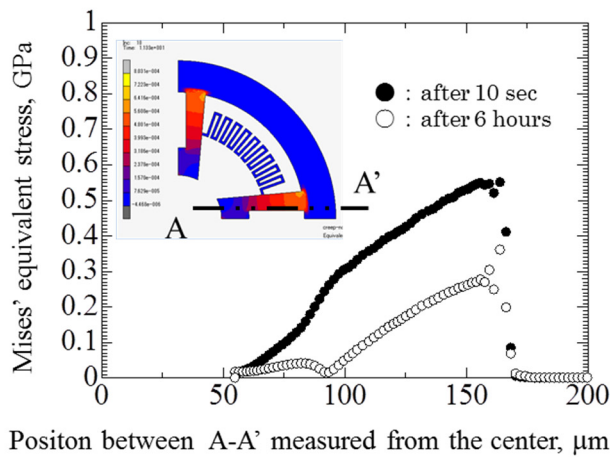


図6 応力-クリープ速度線図



(a) Case A



(b) Case B

図7 クリープ成形シミュレーションによる梁構造領域の相当応力分布

いる。同図において、 α と β の組み合わせから描ける直線は、パターン試料毎に中実丸プロットで示す1点で交差する。両試料に対して同時に成り立つ α と β の組み合わせは、これら2つの交点を通る太実線であり、この切片と傾きが逆解析で求められるクリープ定数 α とクリープ指数 β になる。本研究で使用した温度とSi薄膜試料寸法領域に限っては、 $\alpha=7.52 \times 10^{-11} \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\beta=1.67$ が得られた。

3.2 Si薄膜の高温クリープ成形シミュレーション

前節で得られたクリープ定数および同指数を用いて、センサ構造として合理的であると考えられる数種類の薄膜パターン候補に対して、温度1050°C、保持時間6時間の下で高温パンチクリープ成形シミュレーションを実施した結果、図2に示したCase A、Case Bの2種類の薄膜パターンを採用することとした。両試料ともにボロン不純物ドーピングによるpiezo抵抗素子領域として4つの片持ち梁構造を配置し、互いが矩形バネで接続されている。図7(a)、7(b)に、高温クリープ成形シミュレーションで得られた両試料の梁構造領域内の応力分布を示す。同図(a)において、Case A試料のパンチクリープシミュレーションでは、最大相当応力が約0.55GPa@10秒後、および0.3GPa@6時間後となった。図示は省略するが、6時間経過してからサファイア球モデルを取り除いた後の中央部変位量は45 μm となった。一方、同図(b)のCase B試料では、最大相当応力が約0.60GPa@10秒後、および0.38GPa@6時間後となり、中央部変位量は50 μm であった。何れも成形加工中にSi薄膜の破壊応力には達せず、また、触覚センサとして有効な3次元形状が得られることが予想された。

4. 触覚センサ構造設計および力覚計測原理

本研究で開発する単結晶Si薄膜製ドーム型マイクロ触覚センサ(図1参照)は、ドーム構造体表面に設けたpiezo抵抗素子と3外部抵抗から構成される、1アクティブゲージ法を採用した。また、1つのセンサ上には4つのpiezo抵抗素子が集積されており、4つのゲージ回路を並列接続することで、次式で示す3軸方向の抵抗変化を同時検出する。

$$(\Delta R/R)_x = \Delta R_1/R_1 - \Delta R_3/R_3 \quad (3)$$

$$(\Delta R/R)_y = \Delta R_2/R_2 - \Delta R_4/R_4 \quad (4)$$

$$(\Delta R/R)_z = \Delta R_1/R_1 + \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 + \Delta R_4/R_4 \quad (5)$$

一方、マイクロ触覚センサを実用していくには、Si薄膜製ドーム構造体の破壊を防止する必要がある。本研究では、触覚センサの裏面にサファイア球を埋め込むとともに、表面にエラストマを充填することで、この種の問題を解決することとした。まず、サファイア球および各種エラストマを充填したセンサの有限要素モデルを構築し、センサの検出レンジを推定した。図8(a)、8(b)に、作用外力とセンサモデルに発生する最大応力との関係を示す。同図(a)、(b)より、水平方向、垂直方向ともに、充填するエラストマのヤング率の増加に伴って、Si薄膜内の最大応力が破壊応力に達するときの外力が増加する。例えば、PMMA樹脂を充填することで、水平方向レンジは~1.8N、垂直方向レンジは~10Nとなり、ガイドワイヤ使用時の要求仕様を満たすこととなった。

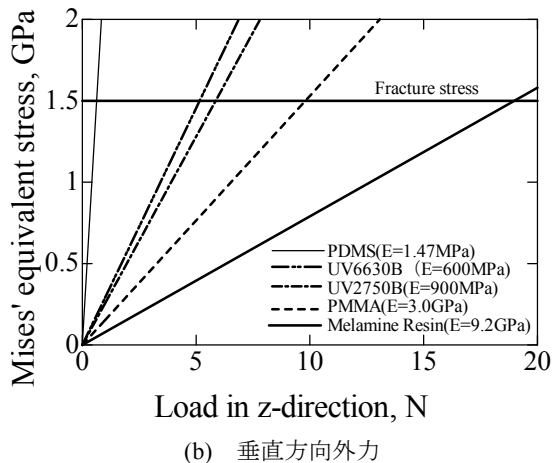
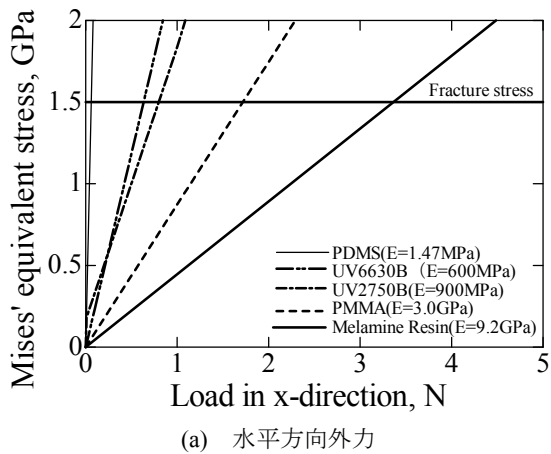
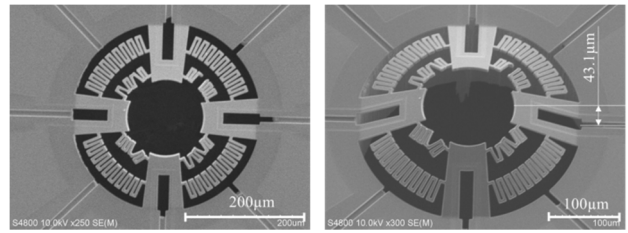


図8 各種エラストマを充填した3次元Si薄膜センサモデルに発生する最大相当応力

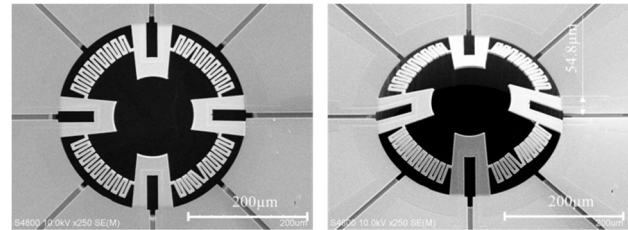
5. 高温クリープ成形結果および考察

Case A、Case BのSi薄膜パターン試料に対して高温パンチクリープ成形実験を実行した。両試料の成形後のSEM写真を図9(a)、9(b)に示す。同図(a)において、Case A試料の中央部最大変位量は約43 μm となり、高温クリープ成形シミュレーションでの予測値45 μm とほぼ一致した。このことから、逆解析で求めたクリープ定数および同指数が妥当であったことがわかる。パンチクリープ成形後の薄膜形状については、ほぼ均一に4つの梁構造が面外方向に変形していることが認められる。しかしながら、パターン中心部付近の矩形バネは不均一な変形を示し、一部分のバネだけが大きく変形または破断に至っている。これは、圧子に用いたサファイア球とSi表面との間の摩擦や凝着に起因しているものと考えられる。すなわち、サファイア球あるいは薄膜表面に付着した有機物などが、高温下で両者の間の摩擦状態に大きく影響を及ぼすことが容易に予想され、これにより矩形バネの変形に差異が生じたと考えられる。

同図(b)において、中央付近の矩形バネが無いCase B試料の最大変位量は54 μm を示し、高温クリープ成形シミュレーションによる予測値50 μm と10%以内の誤差であった。また、パンチクリープ成形後の薄膜形状については偏りが

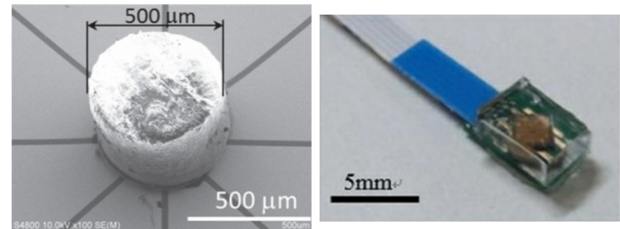


(a) Case A



(b) Case B

図9 クリープ成形後のSi薄膜パターン試料のSEM像



(a) PMMA 充填

(b) PDMS 充填

図10 Si薄膜製触覚センサの外観写真

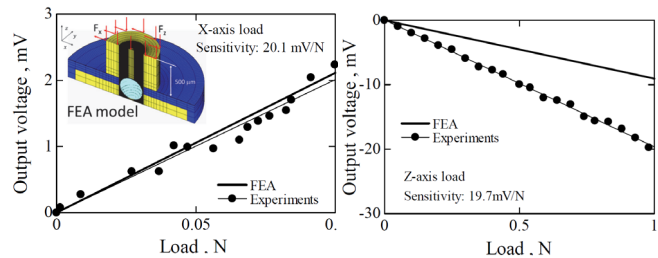


図11 外力に対する出力電圧の変化

発生し、同図写真の下側に位置する梁構造が他の梁に比べて若干面外方向に大きく変形している。これは、中央付近の矩形バネを取り除いたことにより、サファイア球の初期位置が薄膜パターン中心から写真下側にずれてクリープ変形が進展したことに起因している。今後、サファイア球の高精度な位置決め技術の確立が必要である。

図10(a)、10(b)に示すように、パンチクリープ成形加工後にPMMA樹脂およびPDMS樹脂を塗布して完成した触覚センサの開発例をそれぞれ示す。また、図11にPMMA樹脂を充填した触覚センサの水平方向および垂直方向の外力に対する出力電圧の変化を示す。3Vの入力電圧に対して、水平方向および垂直方向の感度は、それぞれ20.1mV/Nおよび19.7mV/Nであり、付与したX、Z方向荷重に対して出力電圧が線形的に変化していることから、極小3軸触覚センサの試作に成功したといえる。

6. まとめ

本研究では、MEMS と高温パンチクリープ成形との融合技術の確立を図ることで、Si 薄膜 3 次元触覚センサの開発を目指した。得られた結果は次のとおりである。

1) 高温クリープ成形シミュレーションに必須となる、マイクロ厚さの Si 薄膜((100)表面)の高温クリープ特性を逆解析的に定量評価した結果、Norton 則におけるクリープ定数およびクリープ指数は、温度 1050°C でそれぞれ $7.52 \times 10^{-11} \text{ MPa}^{-n} \cdot \text{s}^{-1}$ 、1.67 となった。これらの値を用いたセンサ構造薄膜の成形シミュレーション結果と実験結果とは 10%以内の誤差で一致し、逆解析で求めたクリープ特性が妥当であることが示された。

2) センサ設計においては、クリープ成形後の 3 次元 Si 薄膜センサ構造体に PMMA 充填することで、水平方向検出レンジ \sim 1.8N、垂直方向検出レンジ \sim 10N が予想され、ガイドワイヤ使用時の要求仕様を満たすことがわかった。また、高温パンチクリープ成形プロセスを実施した結果、成形シミュレーションの予測値とほぼ一致した変形量を有する 3 次元 Si 薄膜センサ構造体の試作に成功した。

今後は、樹脂充填プロセスの信頼性を高めて、センサを医療機器やロボットハンドに実装していく予定である。

謝 辞

本研究は、平成 27 年度公益財団法人天田財団一般研究開発助成により実施したものであり、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Hidetoshi Takahashi, "A triaxial tactile sensor without crosstalk using pairs of piezoresistive beams with sidewall doping" *Sensors and Actuators*, Vol. 199, pp43-48, (2013).
- 2) H. Yokayama, T. Kanashima, M. Okuyama *et al.*, "Investigation for Sensing of Proximity and Tactile Information Using a Single MEMS Sensor", the 30th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines and Applied Systems, (2013).
- 3) K. Nakajima, K. Fujiwara, W. Pan, H. Okuda, "Shaped silicon-crystal wafers obtained by plastic deformation and their application to silicon-crystal lenses" *Nature Materials*. 4, pp. 47-50, (2005).
- 4) T. Aono, Y. Ebata, S. Matsui, and T. Watanabe, "Large displacement plastic deformation process for silicon parasol structure." *Transducers 2013*, Barcelona, SPAIN, 16-20 June, (2013).
- 5) T. Lee, F. A. Ibupoto *et al.* "A Direct Methodology for Small Punch Creep Test" *Experimental mechanics*, 56, pp.395-405, (2016).
- 6) T. A. Taylor, C. R. Barrett, "Creep and Recovery of Silicon Single Crystals," *Mater. Sci. Eng.* 10, p. 93, p. 102 (1972).
- 7) D. S. Walters, S. M. Spearing, "On the flexural creep of single-crystal silicon", *Scripta mater*, 42, pp.769-774 (2000).