

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2016～2017
課題番号：16K14135
研究課題名(和文) MEMS・高温クリープ成形融合技術によるSi薄膜立体成形と医療用触覚センサの開発

研究課題名(英文) Development of Tiny Tactile Sensor for Medical Tools by Punch Creep Forming of Si Thin Film

研究代表者
磯野 吉正 (Isono, Yoshitada)
神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：20257819
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、単結晶Si薄膜の高温パンチクリープ成形技術を確立し、同手法を用いて医療用極小触覚センサを新開発した。まず、高温パンチクリープ成形シミュレーションに必須となる、Si薄膜に対するクリープ特性を逆解析的に定量評価した。得られたクリープ特性を用いたセンサ成形シミュレーションの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。センサ力検出領域が直径0.32mmの微小触覚センサを、有限要素解析(FEA)によって設計した。最後に、パンチクリープ成形技術による触覚センサの製作に成功し、同センサの力検出感度はFEAによる設計値とほぼ一致した。

研究成果の概要(英文)：This research has developed a high temperature punch creep forming technique combined with a diffusion process of dopant for a downsizing of 3-axis piezoresistive tactile sensor made of Si film. The punch creep forming for micron-thick Si films was able to realize large out-of-plane deformation in a small area. This research has also estimated the creep coefficient and the creep exponent used in the creep constitutive equation for the Si films by backward analysis. The obtained parameters were quite different from those of bulk Si. As a result, the 3D formed piezoresistive tiny tactile sensor with a diameter of 0.32mm as its sensing area was designed by finite element analyses (FEA) using the creep parameters. Finally, we have succeeded in fabricating the tactile sensor by the punch creep forming. Here, the effect of the creep forming on the resistivity was little. Sensitivities in the horizontal and vertical directions of the tactile sensor roughly agreed with predicted values in FEA.

研究分野：実験ナノメカニクス、MEMS

キーワード：高温パンチクリープ成形 MEMS 逆解析 触覚センサ

1. 研究開始当初の背景

近年、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、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、カテーテル先端で過負荷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いる。一方、既存のMEMS 触覚センサは平面基板上に作製されるため、半球形状したガイドワイヤ先端には直接設置することが困難である。また、センサ自体を3次元凸形状した高分子樹脂中に埋め込む必要があり、大幅なセンサ感度の低下を招く。このため、極小分解能を要する低侵襲性医療機器への触覚センサの適用は、これまでのところ皆無である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、MEMS 技術と高温クリープ成形加工との融合技術を確立することで、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を開発することである。具体的には、単結晶 Si 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 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、低侵襲性手術用マイクロ触覚センサの新開発に応用する。ここで、提案する触覚センサの力覚検知には半導体ピエゾ抵抗素子を採用し、また、胆管用カテーテルのガイドワイヤ先端に設置できるように、ドーム直径が350 μm の3軸触覚センサの実現に挑戦する。このため、本研究では、(1)【Si 薄膜に対する高温パンチクリープ成形技術の確立】、(2)【逆解析による Si 薄膜の高温クリープ特性の解明】、(3)【Si 薄膜の高温クリープ成形シミュレーションとセンサ構造設計】、および(4)【高温クリープ成形による触覚センサ開発】を実施する。

3. 研究の方法

(1)【Si 薄膜に対する高温パンチクリープ成形技術の確立】

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。図1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2に、各温度でのボロンドーピングの拡散深さと拡散時間との関係を示す。Si 薄膜厚さに 5 μm を採用したことから、その半分である 2.5 μm をボロン拡散深さに設定した場合、24時間@1000 $^{\circ}\text{C}$ 、6時間@1050 $^{\circ}\text{C}$ 、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。

(2)【逆解析による Si 薄膜の高温クリープ特性の解明】

既に図1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

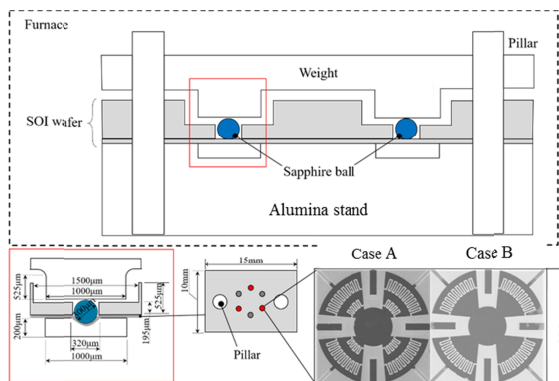


図1 パンチクリープ成形器具の概略図

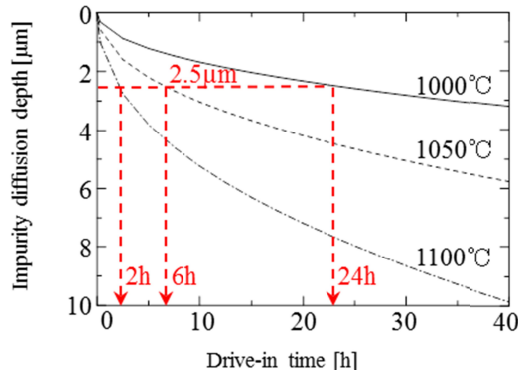


図2 ドライブイン時間がボロン拡散深さに及ぼす影響

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。

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、マイクロスケール 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、同構成式のクリープ定数 α および同指数 β を定量的に求めた。

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

ここで、

$$\alpha = A\exp(-Q/K_B T) \quad (2)$$

図 3 に、高温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。一方、図 4 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。

(3) 【Si 薄膜の高温クリープ成形シミュレーションとセンサ構造設計】

(2)項の方法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 $^\circ\text{C}$ 、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する。また、シミュレーションによって得られる成形後の Si 薄膜の立体構造を検知素子の構造体とした触覚センサの、有限要素弾性解析を実施し、感度予測を行う。

(4) 【高温クリープ成形による触覚センサ開発】

(1)~(3)で確立した実験技術およびシミュレーション結果に基づいて、マイクロ触覚センサの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 【Si 薄膜に対する高温パンチクリープ成形技術の確立】

2 種類の Si 薄膜パターン試料 Case A、Case B に対して、高温パンチクリープ成形実験を実行した。両試料のクリープ成形後の SEM 写真を図 5(a)、5(b)に示す。両試料ともに、ボロン不純物ドーピングによるピエゾ抵抗素子領域として 4 つの片持ち梁構造を配置し、

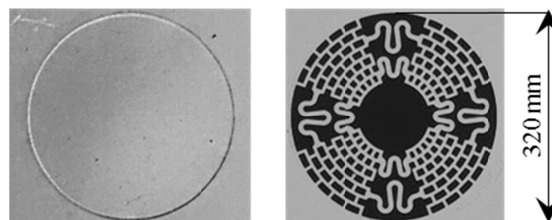


図 3 逆解析用高温パンチクリープ実験に用いた単結晶 Si 薄膜パターン

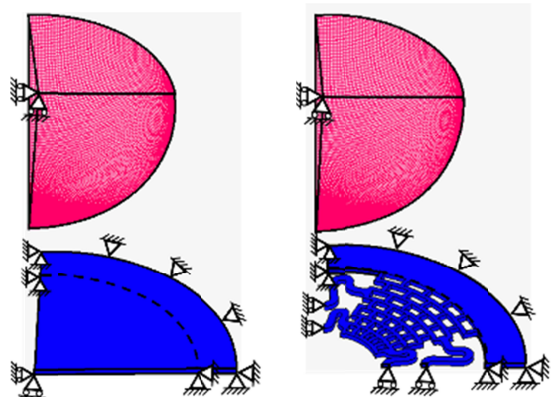


図 4 逆解析用有限要素パンチクリープ成形シミュレーションモデル

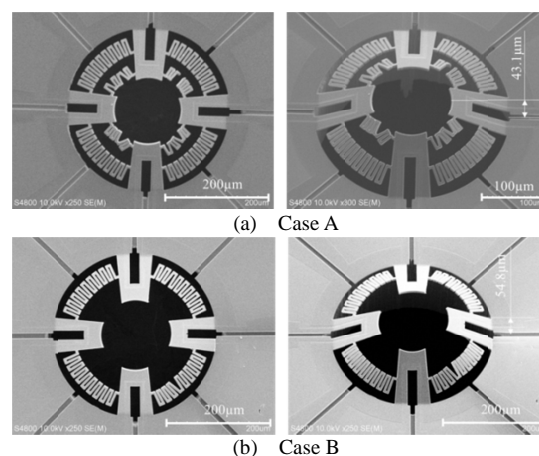


図 5 クリープ成形後の Si 薄膜パターン試料の SEM 像

互いが矩形バネで接続されている。同図(a)において、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。なお、Case A 試料の中央部最大変位量は約 43 μm であった。同図(b)において、パンチクリープ成形後の薄膜形状には偏りが発生し、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、その状態を維持したままクリープ変形が進展したことに起因している、と考えられる。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。なお、Case B 試料の最大変位量は 54 μm であった。

(2) 【逆解析による Si 薄膜の高温クリープ特性の解明】

前述したように、(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の Si 薄膜に対して、温度 1050 $^{\circ}\text{C}$ 、荷重 4.6mN、保持時間 8 時間のパンチクリープ成形実験を実施した。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変位量は、それぞれ 5.1 μm および 40 μm であった。

一方、パンチクリープ成形実験で得られた両パターンの Si 薄膜試料中央部の変位量となるように、クリープ定数 α および同指数 β を変化させながら有限要素シミュレーションを実施した。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 つの交点を通る。このことから、両パターン試料に対して同時に成り立つ α と β の組み合わせは、パターン試料毎で定まる交点を同時に通過する太実線である。すなわち、この太実線の切片と傾きが、逆解析で求められる、1050 $^{\circ}\text{C}$ 、5 μm 厚さを有する Si 薄膜のクリープ定数 α と同指数 β となる。

本研究で使用した温度と Si 薄膜試料寸法領域においては、 $\alpha=7.52 \times 10^{-11} \text{ MPa}^{-\beta} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\beta=1.67$ が得られた。

(3) 【Si 薄膜の高温クリープ成形シミュレーションとセンサ構造設計】

図 5(a)、(b)に示した Case A、Case B の 2 種類のパターン試料に対して、逆解析で得られたクリープ定数 α および同指数 β を用いて、温度 1050 $^{\circ}\text{C}$ 、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。図 7(a)、(b)に、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。これは、実験で得られた中央部最大変位量 43 μm とほぼ一致し、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。

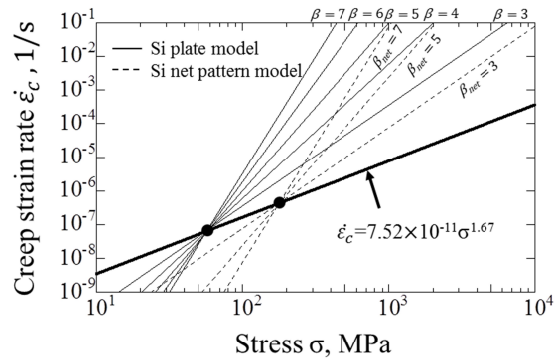
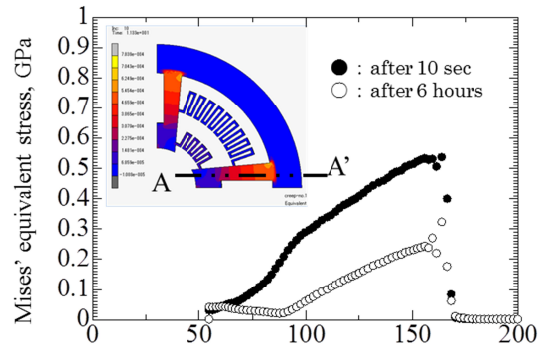
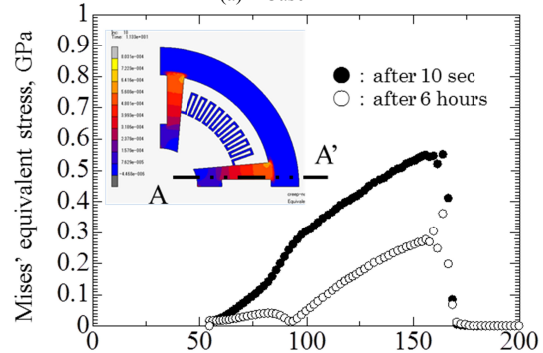


図 6 応力-クリープ速度線図



Position between A-A' measured from the center, μm

(a) Case A



Position between A-A' measured from the center, μm

(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

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。実験で得られた試料中央付近の最大変位量は 54 μm であったことから、約 10%程度の誤差があることがわかった。Case A より誤差が大きくなったのは、実験におけるサファイア球の設置位置のずれによるものと考えられる。

何れの Si 薄膜試料ともに、成形加工中に Si 薄膜の破壊応力には達していないことから、触覚センサとして有効な 3 次元形状であると判断できる。

(4) 【高温クリープ成形による触覚センサ開発】

センサ開発に先立って、ボロン不純物ドーピングによるピエゾ抵抗素子領域を含んだ 4 つの片持ち梁構造に対して、クリープ成形を

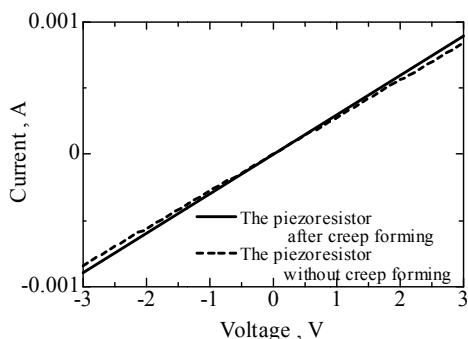


図 8 クリープ成形の有無が電気抵抗値に及ぼす影響

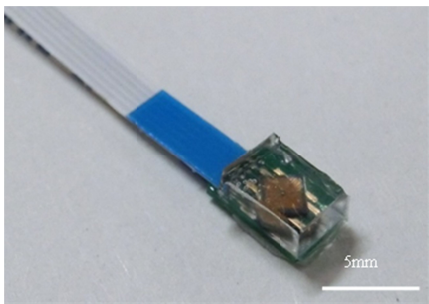


図 9 PDMS で被覆した触覚センサ

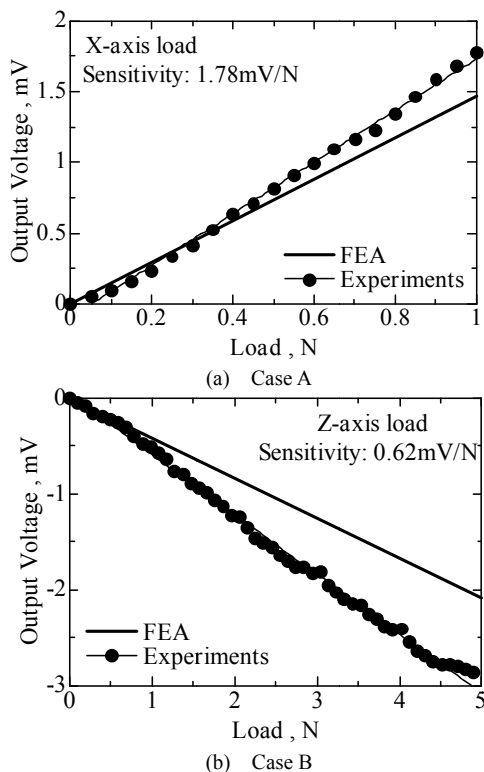


図 10 荷重増加に伴うセンサ出力変化

実施した試料と、クリープ成形を実施せずに不純物拡散工程のみを実施した試料を準備し、クリープ成形の有無が電気抵抗値に及ぼす影響を調べた。図 8 に、上記の両試料のピエゾ抵抗素子に対する $I-V$ 特性評価結果を示す。クリープ成形を伴うピエゾ抵抗素子の電気抵抗値は $3.37\text{k}\Omega$ であるのに対して、クリープ成形未実施の素子のそれは $3.57\text{k}\Omega$ であった。このように、クリープ成形の有無に因る

電気抵抗値の差異は 6%程度と小さく、プレデポジション工程におけるボロン量のばらつきも考慮すると、クリープ成形の有無が電気抵抗値に及ぼす影響は小さいと考えられる。

本研究での触覚センサの MEMS プロセスが全て終了した後、センサ裏面に破壊防止のためサファイア球を再度設置し、内部および外部からセンサを PDMS で被覆し、触覚センサを完成させた(図 9 参照)。X 方向荷重および Z 方向荷重を付与したときのセンサ出力を図 10(a)、(b)に示す。X 方向荷重に対する検出感度は 1.78mV/N 、Z 方向荷重に対する検出感度は 0.62mV/N となった。一方、図示は省略するが、センサの有限要素モデルを用いた有限要素弾性解析では、X 方向荷重に対する検出感度が 1.47mV/N 、Z 方向荷重に対する検出感度が 0.41mV/N となり、両者の差は X 方向で 21%、Z 方向で 51%程度を示した。これは、実センサと解析モデルとの間の、形状寸法や境界条件の差異に起因するものであると考えられる。今後は、繰り返し荷重によるセンサ性能評価や耐久性評価を実施することが重要である。また、本センサの低侵襲性医療機器への適用に向けて、実装技術を構築していく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

山本賢祐, 中田悟史, 菅野公二, 磯野吉正, “逆解析手法による単結晶シリコン薄膜の高温クリープ三次元成形加工技術の確立”, 日本材料学会マルチスケール材料力学シンポジウム, 富山大学五福キャンパス(富山市), 2016年5月27日, P20.

山本賢祐, 中田悟史, 菅野公二, 磯野吉正, “逆解析による単結晶 Si 薄膜の三次元高温クリープ成形加工技術の確立”, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学(神戸市), 2016年10月9日, OS11-23.

山本賢祐, 中田悟史, 菅野公二, 磯野吉正, “逆解析手法による単結晶 Si 薄膜の高温クリープ特性解明と触覚センサ開発への応用”, 平成 28 年電気学会センサ・マイクロマシン部門大会第 33 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 平戸文化センター(長崎県平戸市), 2016年10月24-26日, 24am2-D-1(4p)(査読有り)

大坂憲司, 中田悟史, 山本賢祐, 菅野公二, 磯野吉正, “高温クリープ立体成形技術による極小 MEMS 触覚センサの開発研究”, 第 34 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 広島国際会

議場，広島県広島市，2017年10月31-11月2日，01pm4-PS-154(5p)。(査読有り)
K. Osaka, S. Nakata, K. Yamamoto, T. Toyoda, K. Sugano, Y. Isono, "A Novel 3-axis Tiny Tactile Sensor Developed by 3-D Microstructuring using Punch Creep Forming Process", The 31st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2017), 2018, pp.1036-1039.
(査読有り)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：触覚センサの製造法
発明者：磯野吉正
権利者：同上
種類：特許出願
番号：2016-198484
出願年月日：2016年10月6日
国内外の別：国内

〔その他〕

[http://www.research.kobe-u.ac.jp/
eng-isonolab/index.html](http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-isonolab/index.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

磯野 吉正 (ISONO, Yoshitada)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20257819

(2)研究分担者

なし()

研究者番号：

(3)連携研究者

なし()

研究者番号：