

Cr-N 薄膜横感度を利用した 触覚センサ用カンチレバー小型化のための 最適平面形状の検討

学生員 長野 透也* 非会員 木下 萌香* 学生員 水戸部龍介*
上級会員 安部 隆* 正員 丹羽 英二** 上級会員 寒川 雅之*a)

Optimal Planar Shape for Miniaturization of Cantilevers for Tactile Sensors Using Cr-N Thin Film Lateral Sensitivity

Yukiya Nagano*, Student Member, Moeka Kinoshita*, Non-member, Ryusuke Mitobe*, Student Member,
Takashi Abe*, Senior Member, Eiji Niwa**, Member, Masayuki Sohgwawa*a), Senior Member

(2024 年 12 月 23 日受付, 2025 年 4 月 24 日再受付)

In this study, we investigated the optimum planar shape of a cantilever, which is the sensing element of a MEMS tactile sensor, with the aim of reducing the size of the cantilever. By using a Cr-N thin film with a high gauge factor for the strain gauge and changing the cantilever planar shape to a trapezoidal shape with a widening toward the free end, we experimentally clarified that the sensitivity of the sensor exceeds that assumed from the theoretical formula, and succeeded in miniaturizing the sensor.

キーワード: 触覚センサ, MEMS, マイクロカンチレバー, ひずみゲージ, Cr-N 薄膜

Keywords: tactile sensor, MEMS, microcantilever, strain gauge, Cr-N thin film

1. 緒言

近年, 少子高齢化による労働力不足の解決のため, 様々な分野においてロボットの活用が期待されている。例として, 遠隔治療用の手術支援ロボットや, 工場自動化に向けた器用な操作能力を持つ産業用ロボット⁽¹⁾が注目されているが, これらのロボットでは, 患者の組織や血管, 繊細な部品を傷つけず適切な力で把持する精密な力制御が求められる。このように, ロボットが人間のような繊細かつ高精度な動作を行うには, 人間の触覚を再現した触覚センサが

必要不可欠である。しかし, 触覚センサの開発・利用は, イメージセンサやマイクロフォンなどの視覚⁽²⁾・聴覚⁽³⁾のセンサと比較して大幅に遅れているのが現状である。これは, 人間の触覚が垂直荷重だけでなく, 摩擦等様々な要素によって知覚される複合的な感覚であり, その大きさや方向, 分布などを同時かつ高精度に検出する正確なセンシングが困難⁽⁴⁾であるからである。また, 人間の触覚受容器は指先で最大 140 個/cm²程度存在するため, 同等の高密度な触覚を再現するには, 触覚センサの検知素子の小型化が求められる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

我々はこれまで, 垂直・せん断双方の荷重に対して感度を持つひずみゲージ式のマイクロカンチレバー型触覚センサの開発を行ってきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。先行研究では, センサの小型化, 高感度化を目的として, ひずみゲージ材料や形状の変更, カンチレバー平面形状の変更について検討がなされ, その結果, センサの感度はカンチレバーのサイズに依存することを明らかにした⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。人間と同等, あるいはそれを超える空間分解能で触覚を再現するにはカンチレバーの小型化が求められるが, それにより感度の低下が懸念される。そこ

a) Correspondence to: Masayuki Sohgwawa. E-mail: sohgwawa@eng.niigata-u.ac.jp

* 新潟大学 工学部

〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050
Faculty of Engineering, Niigata University

8050, Ikarashi 2no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181, Japan

** (公財) 電磁材料研究所

〒981-3341 宮城県富谷市成田 9-5-1

Research Institute for Electromagnetic Materials

9-5-1, Narita, Tomiya, Miyagi 981-3341, Japan

で本研究では、ゲージ率が高く縦感度 (10.1) と同等の横感度 (9.0) を有する Cr-N 薄膜⁽¹¹⁾ひずみゲージを用いて、より小さい専有面積に対して高い感度を有するようなカンチレバーの最適平面形状の検討を行う。平面形状の変更は、使用ウェハやプロセスを変えることなく、形状の工夫により感度向上を図ることが可能であり、センサ感度を維持しつつカンチレバーの更なる小型化が可能であると考えられる。また、本研究では、人間の触覚受容器であるマイスナー小体やメルケル触盤と同等の 10~50 μm 程度を目標値として設定し、カンチレバーの小型化を図った。

2. センサの構造と原理

図 1 に作製したセンサの図を示す。本センサは 5 mm 四方のセンサチップ中心部に MEMS 技術を用いて作製した検知素子であるカンチレバーが配置されており、カンチレバー固定端部には Cr-N 薄膜を用いたひずみゲージが形成されている。センサチップは PDMS と呼ばれる非圧縮性のシリコンエラストマによって封止され、接触部として同じく PDMS で作製した半球突起が取り付けられている。

図 2 に触覚センサに垂直荷重・せん断荷重が印加された際のエラストマとカンチレバーの変形の様子を示す。垂直荷重が印加されるとエラストマはその非圧縮性により外側に広がるような変形が生じ、全てのカンチレバーにおいてたわみが増加する。一方、せん断荷重が印加されると荷重が印加された方向にエラストマが引っ張られることで、それぞれのカンチレバーは異なるたわみ変化を示す。ここで、ひずみ ε 、ゲージ率 K_s とすると、ひずみゲージの抵抗変化率 $\Delta R/R$ は(1)式で表される。

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \varepsilon \quad \dots\dots\dots (1)$$

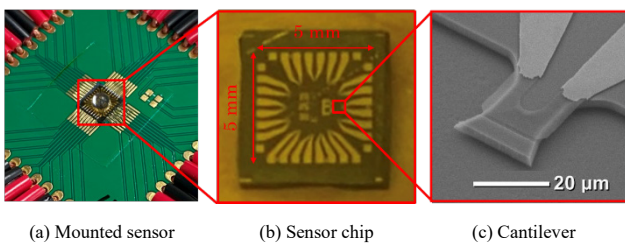


図 1 作製した MEMS 触覚センサ
Fig. 1. Fabricated MEMS tactile sensor.

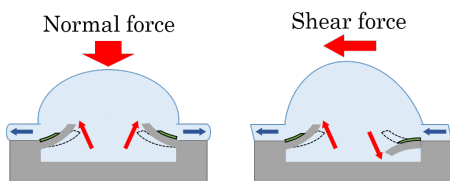


図 2 外力印加に対するカンチレバーの挙動
Fig. 2. Cantilever behavior in response to external force application.

カンチレバーの変形に伴う表面のひずみ変化により、カンチレバー上に形成されたひずみゲージの電気抵抗が変化し、複数のカンチレバーでこれを測定・比較することで印加された力の大きさと方向を検出することができる。また、カンチレバー固定端部に生じるひずみがひずみゲージに加わると仮定すると、ひずみ ε は、等分布荷重 w 、カンチレバー長さ l 、幅 b 、厚さ h 、縦弾性係数 E として(2)式⁽⁹⁾⁽¹²⁾で表される。

$$\varepsilon = -\frac{3wl^2}{bh^2E} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ひずみ ε は、カンチレバー長さ l の 2 乗に比例し、抵抗変化率 $\Delta R/R$ はひずみ ε に比例するため、センサ感度はカンチレバーが小さくなるにつれ低下する。これまでに作製された最小サイズのカンチレバー⁽¹⁰⁾のセンサ感度は、長さ 100 μm、自由端幅 50 μm、固定端幅 36 μm のカンチレバーで、垂直荷重に対しては約 350 ppm/N、せん断荷重に対しては約 600 ppm/N、最小検知可能な力の大きさは約 0.03 N であった。本研究ではこれを目標の感度とし、更なる小型化を目指す。

3. センサの作製工程

図 3 にセンサチップの作製工程を示す。センサ基板には Si 支持基板厚 500 μm 上に SiO₂ (buried oxide; BOX) 層 1 μm を介して薄膜 Si 活性層 2.5 μm が形成された SOI (silicon on insulator) ウェハを用いる。ウェハは有機物除去処理のためアセトン、変性エタノールに浸して超音波洗浄を行った後、濃度 1% のフッ酸で Si 層表面の自然酸化膜除去 (酸化膜処理) を行っておく。まず初めに、図 3 (a) に示す通り、スパッタリング法を用いて絶縁層となる Si₃N₄、ひずみゲージ層となる Cr-N、配線層となる Au をそれぞれ 100 nm, 33 nm, 300 nm の厚さで成膜する。なお、Cr-N については、共同研究先である電磁材料研究所にて成膜後、真空中にて 290°C で熱処理を行った。次に、図 3 (b), (c) に示すように、フォトリソグラフィ法とエッチングにより不要な Au, Cr-N, Si₃N₄

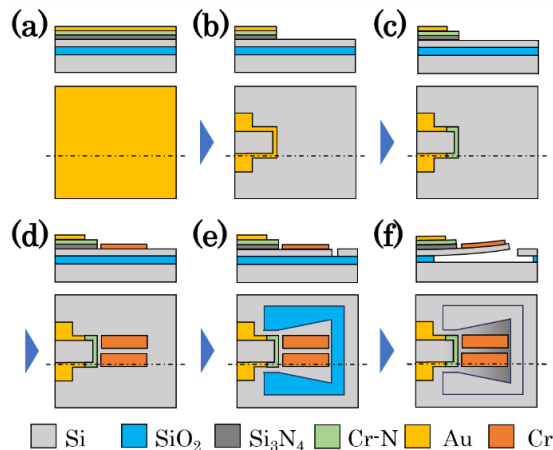


図 3 センサチップ作製工程
Fig. 3. Sensor chip fabrication process.

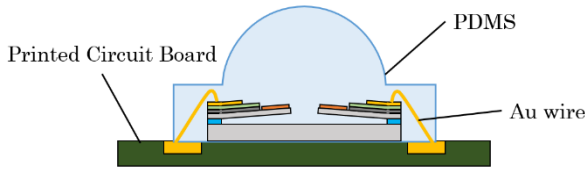


図 4 実装後のセンサの断面構造

Fig. 4. Cross-sectional structure of the sensor after mounting.

層を除去し、配線、ひずみゲージをパターンニングする。次に、図 3 (d) に示すように、Si 層表面を 1% フッ酸で酸化膜処理した後、真空蒸着により Cr を 100 nm 成膜し、リフトオフ法を用いて応力制御層を形成する。続いて、図 3 (e) に示すように RIE (反応性イオンエッチング) を用いてカンチレバー外側の Si 層を除去し、SiO₂ 層を露出させカンチレバーのパターンを形成する。次に、ウェハをセンサチップの大きさにダイシングした後、バッファードフッ酸 (ステラケミファ, NH₄HF₂ 含有量 20%) に約 2 時間浸すことで SiO₂ 層を犠牲層として除去し、図 3 (f) に示すような中空構造を得ることができる。また、支持基板から切り離されたカンチレバーは、Cr と Si の線膨張係数の差による残留引張応力により下に凸になるように反った初期たわみを持つ形状となる。犠牲層エッチング終了後、センサチップ上のフォトレジストを専用の剥離液 (MICROPOSIT REMOVER 1165, Dow Inc) で剥離した後、純水でリンス、エタノールで置換後、真空乾燥させる。乾燥前に純水を表面張力の小さいエタノールで置換することで、カンチレバーと基板のスティッキングを防ぐことができる。以上の工程により、センサチップが完成する。

続いてセンサの実装を行う。まず初めに、リジッド回路基板 (Printed Circuit Board : PCB) にエポキシ樹脂系・化学反応系接着剤 (ボンドハイスピードエポ, コニシ) を用いて、作製したセンサチップを接着する。次に、ボンディングマシンを用いてセンサチップとリジッド基板を Au ワイヤで繋ぎ、電気的に接続する。続いて、カンチレバーと Au ワイヤ接続部を保護するため、主剤と硬化剤を 10:1 の比率で混合し、攪拌、脱気した PDMS (Silpot 184, Dow Corning Toray) をスピコータ (MS-A100, ミカサ) を用いて塗布し、90°C の恒温炉で 30 分ベークすることで硬化させる。最後に、硬化した PDMS 層上に未硬化の PDMS を接着剤として使い、半球状の突起を取り付ける。この時、半球突起の中心がセンサチップの中心と重なるよう位置を調節する。再度 90°C の恒温炉で 30 分ベークすることで半球突起を固定する。図 4 に実装後のセンサの断面構造を示す。

4. 有限要素法解析

〈4・1〉 解析手法 図 5 に本研究におけるカンチレバー設計の概略図を示す。本研究では、ひずみゲージ材料に Cr-N 薄膜を用いて固定端上に横向きに配置し、カンチレバー平面形状を自由端に向けて幅が広がる台形型⁽¹³⁾に変更し

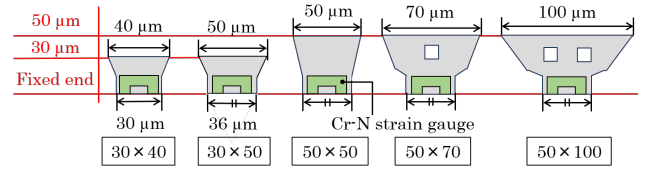


図 5 カンチレバー設計概略図

Fig. 5. Cantilever design schematic.

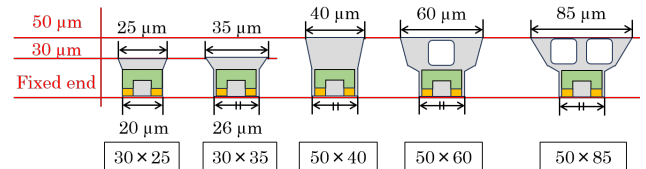


図 6 実際に作製したカンチレバーの概略図

Fig. 6. Schematic of the actual cantilever fabricated.

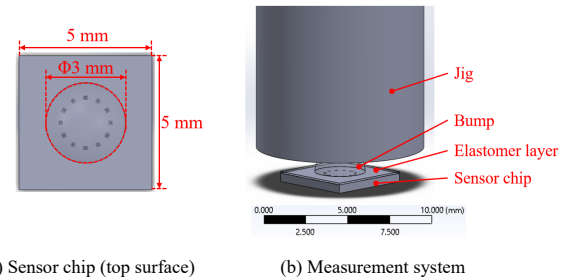


図 7 作成した 3D モデル

Fig. 7. Created 3D model.

た。ここで、Cr-N ひずみゲージは、抵抗値が市販のひずみゲージと同程度の 120 Ω となるように設計した。また、サイズの大きい 2 つのカンチレバーで設けた穴は、犠牲層エッチングで加工を行う際に必要となるフッ酸導入口である。しかし、本研究で作製した実際のカンチレバーは、作製プロセス中の現像時間超過もしくはサイドエッチングにより、パターンが設計より小さくなったため、実際の寸法を反映したカンチレバー形状の概略図を図 6 に示す。実際のカンチレバーの寸法は、光学顕微鏡で計測したところ、固定端幅は 10 μm 程度、自由端幅は 10~15 μm 程度小さくなっており、長さ方向では自由端・固定端ともに 10 μm 程度後退していることが確認できた。これらのカンチレバーに垂直荷重を印加した際にカンチレバーのひずみゲージ部に生じるひずみについて有限要素法を用いて解析を行う。まず初めに解析の前準備として、SOLID WORKS 2022 を用いてセンサと計測系の 3D モデルを作成する。図 7 (a) に示すように、図 6 で示した実際のカンチレバー形状を反映したモデルを Si 基板モデルとアセンブリし、センサチップのモデルとして組み立てる。ここで、カンチレバーモデルは Φ 3 mm の半球突起内に収まるよう、Φ 2 mm の円周上にカンチレバー固定端を配置した。また、図 7 (b) に示すように、センサチッ

プをエラストマ層, 半球突起, Φ 10 mm の押し込み治具モデルとアセンブリし, 計測系として組み立てる。また, エラストマ層はセンサチップと重なるようにアセンブリした後, キャビティによってセンサチップ形状に沿って中をくり抜くことで, エラストマ層がセンサチップの周りに充填されている状態を作った。これで計測系の 3D モデルの完成である。

次に, 有限要素法によるひずみ量解析を解析ソフト ANSYS Workbench 18.1 を用いて行った。解析は解析システム選定, 使用材料選定, 3D モデル挿入, 解析条件設定, 解析実行の順に行う。ひずみ量の解析には静的構造という解析システムを用いる。使用材料に関しては, センサチップとカンチレバーを Si, エラストマを PDMS, 押し込み治具をアクリルとした。各材料の物性値に関しては, PDMS およびアクリルは等方性弾性材料とし, PDMS はヤング率 1.5 MPa, ポアソン比 0.499, アクリルはヤング率 2300 MPa, ポアソン比 0.266 と定義した。また, Si は方向で弾性係数が異なる異方性弾性材料であり, 応力 $[\sigma]$ とひずみ $[\varepsilon]$ は弾性マトリクス $[D]$ より(2)式で表される。

$$[\sigma] = [D][\varepsilon] \dots\dots\dots (3)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix}$$

$$S_{11} = 1.657 \times 10^{11} \text{ [Pa]}, \quad S_{12} = 6.39 \times 10^{10} \text{ [Pa]}, \\ S_{44} = 7.96 \times 10^{10} \text{ [Pa]}$$

続いて解析条件の設定を行う。解析対象のカンチレバーに関しては, 自由端方向に x 軸, 鉛直上向き方向に y 軸が向くよう個別に座標系を設定し, メッシュコントロールを施しておく。ここでは垂直荷重印加時の解析を行うため, 図 8 に示す通り, 押し込み治具上面に鉛直下向きの荷重 0.5 N 印加, 押し込み治具側面は摩擦無し支持, センサチップ底面固定と設定する。以上の条件を設定後, ひずみゲージ部に生じるひずみ量に関して解析を実行した。

〈4・2〉 解析結果 図 9 に, 図 6 で示した台形型カンチレバー計 5 種類と, 比較用として, 先行研究⁽¹⁰⁾で作製された長さ 100 μm, 自由端幅 50 μm, 固定端幅 36 μm の従来型カンチレバーの 3D モデルを示す。ここでカンチレバーの長さとは, 固定端 (Fixed end) から自由端 (Free end) までの直線距離である。また, 図 10 は先ほど述べた条件で垂直荷重を 0.5 N 印加した際の解析結果を示しており, ひずみゲージ部でカンチレバー長手方向に生じるひずみ量を表している。表示カラースケールは -80.0 ppm ~ 62.4 ppm で統一しており, 正のひずみは引張ひずみ, 負のひずみは圧縮ひずみを示す。ここでは, 垂直荷重を印加しているため, 解析結果においてより青色に近い色で示される圧縮ひずみが生

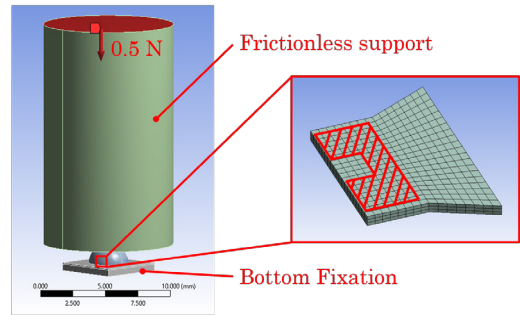
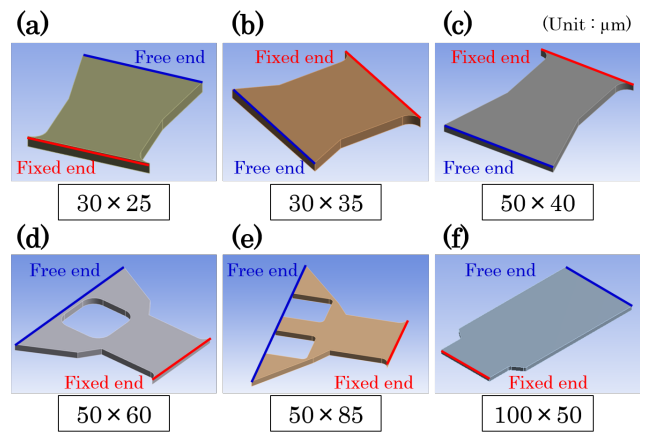
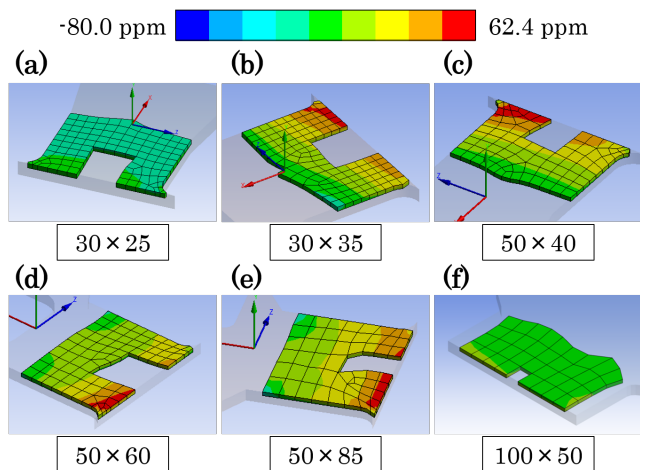


図 8 荷重・拘束条件とひずみ解析部分
Fig. 8. Load/constraint conditions and strain analysis section.



(a) model 30×25, (b) model 30×35, (c) model 50×40,
(d) model 50×60, (e) model 50×85, (f) model 100×50

図 9 カンチレバー 3D モデル
Fig. 9. Cantilever 3D model.



(a) model 30×25, (b) model 30×35, (c) model 50×40,
(d) model 50×60, (e) model 50×85, (f) model 100×50

図 10 カンチレバー長手方向に生じるひずみ量の解析結果

Fig. 10. Results of analysis of the amount of strain in the longitudinal direction of the cantilever.

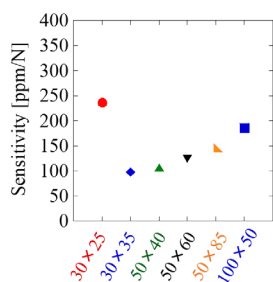


図 11 解析結果から想定される感度

Fig. 11. Sensitivity assumed from analysis results.

じる領域に注目した。各カンチレバーの解析結果を比較すると、図 10 (b)~(e) に示す 4 つの台形型カンチレバーでは、圧縮ひずみに加え固定端付近で微小な引張りひずみが混在しているのに対し、図 10 (a) に示す最小サイズのモデル (30 μm × 25 μm) では圧縮ひずみだけが生じる結果となった。また、ひずみゲージ横配置部に生じる圧縮ひずみの平均値をひずみゲージに生じるひずみと仮定し、ゲージ率 (9.0) を乗じて 1 N 当たりの抵抗変化率を算出し、想定される感度を示したグラフを図 11 に示す。先行研究と同様に、専有面積が大きくなるにつれ感度が上昇する傾向が得られたものの、最小サイズのモデル (30 μm × 25 μm) では、サイズから想定される感度より高い感度を示した。最も小さい専有面積でありながら、想定される感度、圧縮ひずみの分布とともに最も良い結果が得られた理由としては、30 μm × 25 μm のカンチレバーのみ固定端幅の設計を 36 μm から 30 μm に変更しており、また、作製プロセス上の問題によりさらに固定端幅が狭くなったことで、固定端部により応力が集中したことが原因であると考えられる。以上の解析結果から、今回新たに設計した台形型カンチレバーでは、より小さい寸法で従来のカンチレバーと同等、あるいはそれ以上の感度が得られたため、感度を維持しつつカンチレバーの小型化が可能であると推測できる。これらのモデルと同形状の、実際に試作したセンサについて荷重印加実験を行い、感度を確認することとする。

5. 実験方法

図 12 に本研究で用いた主な実験系の概要図を示す。本実験においてセンサの固定、移動には 3 軸電動ステージ (SGSP26-150/SGSP-60YAW-OB/SHOT-204MS, Sigma-koki)、アクリル治具押し込み時の垂直荷重・せん断荷重、曲げモーメントの計測には 6 軸力覚センサ (SFS0036, Leprino)、触覚センサの電気抵抗計測にはデジタルマルチメータ (7470, ADCMT/7481, ADCMT/R6581, ADVANTEST) を使用した。実験は、PC プログラムを用いて電動ステージを制御し、アクリル治具をセンサ検知部に押し当て荷重の印加・除荷を行い、この際の 6 軸力覚センサとデジタルマルチメータの出力を PC に取り込み、計測結果をグラフ化する手順で行った。本実験では、荷重を印加・除荷する際のステージ移動速度を 0.01 mm/s、6 軸力覚センサとマルチメータ、ステー

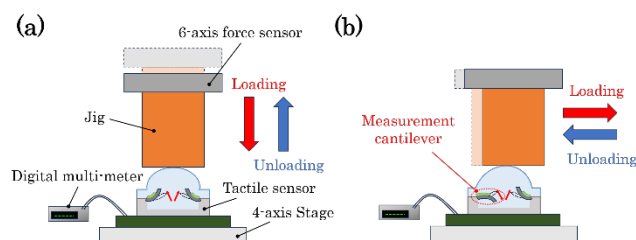


図 12 (a) 垂直, (b) せん断荷重印加実験系

Fig. 12. Experimental system with (a) normal and (b) shear load applied.

ジ移動量のサンプリング周期は 0.1 s とした。

垂直荷重に対する応答測定の実験方法を図 12 (a) に示す。まず初めに、触覚センサ中心とアクリル治具中心を同軸上にそろえた後、触覚センサに 0.1 N の垂直荷重が加わるようにアクリル治具を接触させ、この点をステージの原点と設定する。その後、0.5 N 垂直荷重が印加される位置まで原点からさらにアクリル治具を押し込んだ後、原点に戻して除荷し、その際の 6 軸力覚センサとマルチメータの出力を測定する。また、せん断荷重に対する応答測定の実験方法を図 12 (b) に示す。まず初めに、センサに 0.5 N の垂直荷重を印加し、この状態を原点とする。6 軸力覚センサとマルチメータの出力の測定は、カンチレバー固定端から自由端に向かう方向に水平ステージで 500 μm アクリル治具をスライドさせた後、原点に戻るまでの間行った。

6. 実験結果

〈6・1〉 カンチレバー形状の違いによる応答の比較

本節では、新たに設計した台形型カンチレバー 5 種類について感度の比較を行う。図 13 に、縦軸を垂直荷重・せん断荷重に対するセンサ感度としてカンチレバーの形状間で比較したグラフを示す。ここで、センサ感度は単位荷重当たりの抵抗変化率を示す。また、前章で述べた通り、実際の実験での印加荷重は 0.5 N であるため、測定結果のグラフから近似直線の式を求め、その傾きから 1 N 当たりの抵抗変化率を推定した。測定結果は、垂直荷重・せん断荷重ともにカンチレバーの専有面積が大きくなるにつれ感度が上昇する傾向が得られ、第 4 章の解析結果と同様に、最小サイズである 30 μm × 25 μm のカンチレバーのみサイズから想定される感度より高い感度を示した。このような結果となった理由としては、前章で述べた通り、他の 4 種類のカンチレバーに比べ固定端幅の設計が狭いことと、作製プロセス中の問題によりさらに固定端幅が狭くなったため、固定端部により応力が集中したことが原因であると考えられる。以上の結果から、平面形状を変更し固定端幅を狭くすることで、効果的にひずみの集中を活用し、カンチレバーを小型化した際の感度低下を軽減することが可能であることが確認できた。

〈6・2〉 先行研究との比較 図 14 に示す本研究で作製した台形型カンチレバーの中で最小サイズのカンチレバー

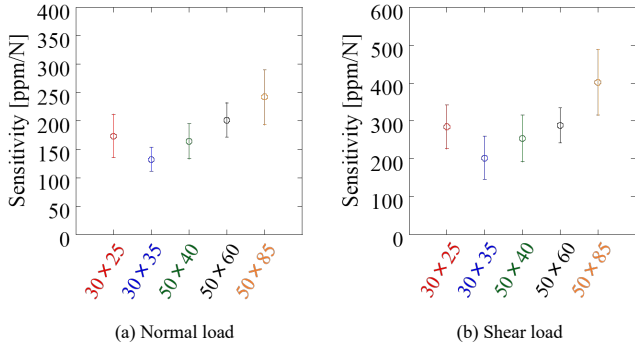


図 13 カンチレバー形状による感度比較

Fig. 13. Comparison of sensitivity by cantilever shape.

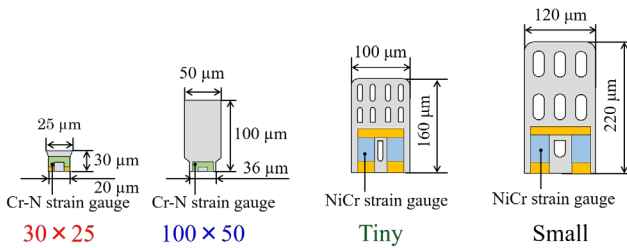


図 14 先行研究とのカンチレバーサイズの比較

Fig. 14. Cantilever size comparison with previous studies.

である $30\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ のモデルと、先行研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾で作製された 3 種類のカンチレバーについて、カンチレバーの長さ L と $1\ \text{N}$ 当たりの抵抗変化率の関係を表したグラフを図 15 に示す。また、グラフ上の直線はカンチレバー形状を矩形として、アスペクト比 (長さ : 幅) を 2:1 と仮定した場合に (1) 式から導かれる Cr-N と NiCr のそれぞれの想定感度を示している。ここで、カンチレバー固定端部に生じるひずみがひずみゲージに加わると仮定し、ひずみ ε は、(2) 式より求めた。アスペクト比を一定のまま小型化したとすると、本研究で作製したカンチレバーは従来の $100\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ のカンチレバーの $1/3$ 以下の長さであるため、感度も $1/3$ 以下になると想定される。しかし、垂直荷重・せん断荷重に対する感度はともに $1/2$ 程度の低下にとどまっておらず、形状を台形に変更することで感度向上の効果が得られたと考えられる。また、図 16 のグラフは、本研究で作製した台形型カンチレバー 5 種類と先行研究で作製された $100\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ のカンチレバーの専有面積と感度の関係を示している。垂直荷重を $1\ \text{N}$ 印加した際の専有面積当たりの感度を比較すると、従来の $100\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ のカンチレバーでは約 $0.0744\ \text{ppm}/\mu\text{m}^2$ であるのに対し、本研究で作製した $30\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ のカンチレバーでは約 $0.283\ \text{ppm}/\mu\text{m}^2$ となり、単位面積当たり約 3.8 倍の感度が得られた結果となった。感度の値は目標としていた $1/2$ 程度となったものの、本研究で作製した $30\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ のカンチレバーの専有面積は従来の $100\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ のカンチレバーの $1/7$ 以下であり、大幅な小型化に成功した。

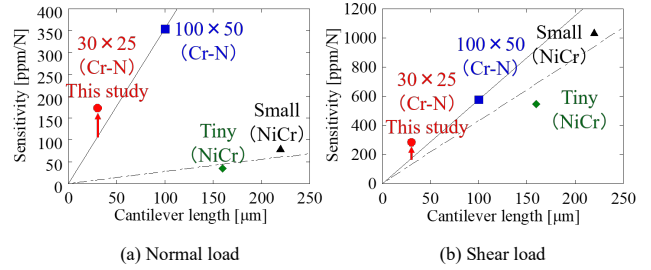


図 15 先行研究との感度比較

Fig. 15. Sensitivity comparison with previous studies.

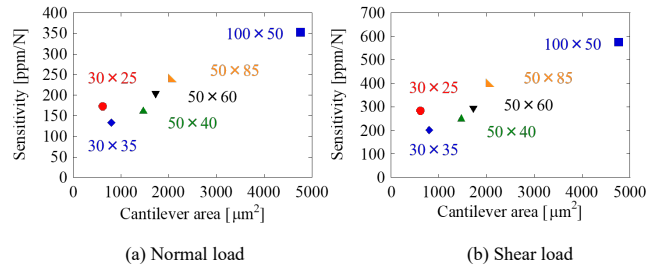


図 16 専有面積による感度比較

Fig. 16. Sensitivity comparison by exclusive area.

7. 結 言

本研究では、人間と同等、あるいはそれを超える空間分解能を持つ触覚機能を目指し、従来の MEMS 触覚センサの感度を維持しつつ、検知素子であるカンチレバーの更なる小型化を図った。Cr-N 薄膜横感度を利用した触覚センサのカンチレバー平面形状を自由端に向け幅が広がる台形型に変更することで、感度を維持しつつ小型化が可能であることを解析により確認し、実際に設計、作製、評価を行った。その結果、長さ $100\ \mu\text{m}$ 、幅 $50\ \mu\text{m}$ である従来型のカンチレバーに対し、 $1/3$ 以下の大きさである長さ $30\ \mu\text{m}$ 、幅 $25\ \mu\text{m}$ のカンチレバーにおいて、垂直荷重・せん断荷重ともに想定より高い $1/2$ 程度の感度が得られた。また、専有面積当たりの感度は、従来型のカンチレバーの約 3.8 倍であり、これらの結果から、カンチレバー平面形状の変更により感度向上の効果が得られ、小型化に成功したと言える。しかし、作製工程中の問題により実際のカンチレバーは設計よりも大幅に小さくなってしまったため、作製条件の見直しが必要である。加えて、フッ酸導入口を形成したモデルでは、導入口が設計より大きくなったことで剛性が低下し、設計通りに作製した場合に想定される感度よりも低感度な結果となったことから、導入口の適切なサイズや配置の検討も必要である。今後は設計通りに作製した場合の応答についても確認を行い、更なるカンチレバー平面形状の最適化に向け検討を行っていく。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H01442 の助成を受けたものである。

文 献

- (1) S. Sakakibara : "Factory Automation with Intelligent Robots Augmented by IoT and AI", *System, Control and Information*, Vol.61, No.3, pp.101-106 (2017) (in Japanese)
 榊原伸介 : 「知能ロボットによる工場自動化と IoT, AI 活用について」, システム/制御/情報, Vol.61, No.3, pp.101-106 (2017)
- (2) M. Yachida : "Visual Sensing for Robot", *The Institute of Image Information and Television Engineers*, Vol.57, No.1, pp.53-56 (2003) (in Japanese)
 谷内田正彦 : 「ロボットののための視覚センシング技術」, 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.1, pp.53-56 (2003)
- (3) H. Okuno : "Robot Audition: Present and Future", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.28, No.1, pp.2-5 (2010) (in Japanese)
 奥野 博 : 「ロボット聴覚の現状と展望」, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.1, pp.2-5 (2010)
- (4) M. Tanaka : "Investigation of Tactile Mechanism and a Tactile Sensor System", *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.82, No.1, pp.20-25 (2016) (in Japanese)
 田中真美 : 「触覚・触感のメカニズムの解明とセンサシステム」, 精密工学会誌, Vol.82, No.1, pp.20-25 (2016)
- (5) A. Nagakubo : "A Review of Flexible and Stretchable Tactile Sensor for Real Use", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.37, No.5, pp.401-404 (2019) (in Japanese)
 長久保晶彦 : 「柔軟な触覚センサ 実用に向けて」, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.5, pp.401-404 (2019)
- (6) Y. Iwamura : "Structure and function of human tactile receptors", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.2, No.5, pp.438-444 (1984) (in Japanese)
 岩村吉晃 : 「ヒト触覚受容器の構造と特性」, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.5, pp.438-444 (1984)
- (7) M. Sohagawa, D. Hirashima, Y. Moriguchi, T. Uematsu, W. Mito, T. Kanashima, M. Okuyama, and H. Noma : "Tactile sensor array using microcantilever with nickel-chromium alloy thin film of low temperature coefficient of resistance and its application to slippage detection", *Sens. Actuators A*, Vol.186, pp.32-37 (2012)
- (8) H. Ohnishi, H. Tachibana, Y. M. Huang, M. Sohagawa, T. Kanashima, M. Okuyama, K. Yamashita, M. Noda, and H. Noma : "Stability Improvement of Tactile Sensor of Normal and Shear Stresses Using NiCr thin Film Gauge", *IEEJ Trans. SM*, Vol.129, No.11, pp.411-416 (2009)
- (9) R. Kaneta, T. Hasegawa, J. Kido, T. Abe, and M. Sohagawa : "Redesigned Microcantilevers for Sensitivity Improvement of Microelectromechanical System Tactile Sensors", *J. Robot. Mechatron.*, Vol.34, No.3, pp.677-682 (2022)
- (10) M. Kinoshita, R. Mitobe, T. Hasegawa, T. Abe, E. Niwa, and M. Sohagawa : "Miniaturization of Cantilever-type Sensing Elements for Tactile Sensors Using Cr-N Thin Film Transverse Sensitivity", E7-C-p1-3 (2021) (in Japanese)
 木下萌香・水戸部龍介・長谷川拓海・安部 隆・丹羽英二・寒川雅之 : 「触覚センサ用カンチレバー型検知素子の Cr-N 薄膜横感度を利用した小型化」, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, E7-C-p1-3 (2021)
- (11) E. Niwa : "Large Transverse Sensitivity and Force Sensor Application of Strain Sensitive Cr-N Thin Films", *IEEJ Trans. SM*, Vol.141, No.12, pp.409-416 (2021) (in Japanese)
 丹羽英二 : 「Cr-N ひずみセンサ薄膜の大きな横感度と力センサ応用」, 電学論 E, Vol.141, No.12, pp.409-416 (2021)
- (12) Y. Arimitsu : *Illustrated Mechanics of Materials for the First Time*, Technical Review Company, p.285 (1999) (in Japanese)
 有光 隆 : 図解でわかる はじめての材料力学, 技術評論社, p.285 (1999)
- (13) R. Mitobe, K. Murakami, Y. Zheng, H. Kadota, T. Abe, and M. Sohagawa : "Improvement of Sensitivity of MEMS Tactile Sensors by Improving Cantilever Planar Geometry", *The Japan Society of Mechanical Engineers*, J224p-18 (2023) (in Japanese)
 水戸部龍介・村上 健・鄭 盈權・門田秀人・安部 隆・寒川雅之 : 「MEM 触覚センサ用のカンチレバー平面形状の改良による感度向上」, 日本機械学会, J224p-18 (2023)

長 野 透 也



(学生員) 2024 年 3 月新潟大学工学部機械システム工学プログラム卒業。同年 4 月同大学大学院自然科学研究科材料生産システム専攻博士前期課程入学, 現在に至る。現在 MEMS 触覚センサの研究に従事。

木 下 萌 香



(非会員) 2023 年 3 月新潟大学工学部機械システム工学プログラム卒業。同年 4 月同大学大学院自然科学研究科材料生産システム専攻博士前期課程入学, 現在に至る。現在 MEMS 触覚センサの研究に従事。

水 戸 部 龍 介



(学生員) 2022 年 3 月新潟大学工学部機械システム工学プログラム卒業。2024 年 3 月同大学大学院自然科学研究科材料生産システム専攻博士前期課程修了。同年 4 月同大学大学院自然科学研究科材料生産システム専攻博士後期課程入学, 現在に至る。現在 MEMS 触覚センサの研究に従事。

安 部 隆



(上級会員) 1992 年 3 月名古屋大学工学部卒業。1997 年同大学大学院工学研究科博士課程修了。2003 年 4 月東北大学准教授。2010 年 4 月新潟大学大学院自然科学研究科教授, 現在に至る。DRIE 装置と水晶 MEMS 全般に関する研究に従事。

丹 羽 英 二



(正員) 1987 年 3 月弘前大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了。同年(財)電気磁気材料研究所(現,(公財)電磁材料研究所)入所。主に非線形光学用化合物半導体結晶の育成とその評価に関する研究を経て, 現在, 薄膜センサ材料の研究開発に従事。デバイス用高機能材料開発部門, 特任研究員。博士(工学)東北大学。

寒 川 雅 之



(上級会員) 2000 年 3 月大阪大学基礎工学部卒業。2005 年 3 月同大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。2007 年 10 月大阪大学助教。2013 年 4 月新潟大学工学部助教。2016 年 4 月新潟大学工学部准教授, 現在に至る。現在, 主に触覚センサ, バイオセンサ等の MEMS センサデバイスの研究に従事。