

論文の内容の要旨

論文題目 埋め込み型せん断ひずみセンサの設計論

氏名 細野 美奈子

1. 序論

本研究は、ヤング率の小さい柔軟な弾性体のせん断ひずみを計測対象とした埋め込み型せん断ひずみセンサについて、解析的手法および実験的手法双方を用いて性質を調べ、その結果からセンサの設計指針を提案する。

高分子材料を代表とする、ヤング率1 MPa以下の柔軟な弾性体の微小領域に働くせん断方向の動的な応力やひずみを直接計測する技術が幅広い分野において必要とされている。これに対し、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術は μm オーダーのサイズの構造を製作、加工することが可能であるため、これまでMEMS技術を用いた微小なセンサの開発、研究が数多く行われてきた。一つの例として、突起構造を計測対象に埋め込んでせん断方向の静的、準静的ひずみや応力を計測した埋め込み型センサが挙げられる。しかし、計測可能周波数帯域や応答の追従性といったセンサの動的応答特性に関して、埋め込まれたセンサや計測対象の構造、物性値が与える影響は明らかにされておらず、センサの設計指針も明確になっていない。

本研究では、 piezo抵抗層の形成された起立したマイクロカンチレバーをセンサ素子とする埋め込み型せん断ひずみセンサに関して、計測対象と埋め込み型センサの構造や物性が、センサの計測可能周波数帯域、応答の追従性といった動的応答特性に与える影響を理論的解析および実験的手法により明らかにする。さらに、得られた結果をもとに、埋め込み型せん断ひずみセンサの設計指針を提案する。

2. 理論・解析

本研究で用いる埋め込み型せん断ひずみセンサと計測手法の概要を図1に示す。図1に示すように、計測対象となる弾性体よりもセンサ素子である起立カンチレバーが十分小さいため、弾性体がせん断方向に変形する際、埋め込まれたセンサ素子は弾性体の変形にならう。このとき piezo抵抗層のひずみから生じる抵抗変化を計測することで、弾性体に生じるせん断ひずみを検出する。図2(a)に起立させる前の真直カンチレバーと各部寸法を示す。図2(a)より、センサ素子となるカンチレバーは二脚部（以下、ヒンジ部）と磁性材料の成膜された領域（以下、プレート部）からなっている。ヒンジ部表面に piezo抵抗層が形成されており、プレート部には磁性材料としてニッケルが成膜されている。また、カンチレバーの形状は元々真直であるが、図2(b)に示すように、磁場をかけてプレート部を磁化させたまま蒸着したパリレン膜の張力によって、カンチレバーは起立状態を維持している。また、パリレン膜の厚さを調整すれば、起立カンチレバーのせん断方向変位に対する等価剛性を調整することができる（図2(c)）。

はじめに、本研究でセンサの設計指針の一つとして用いるため、センサ素子および弾性体のせん断方向変位に対する等価剛性を導いた。弾性体に埋めていないセンサ素子の集中荷重に対する変形を図3に示す。本研究では、プレート部端点にせん断方向集中荷重 F が負荷された起立カンチレバーのせん断方向変位に対する等価剛性 k_c を図3のように表すこととした。また、図4(a)に示すような計測対象弾性体単体のモデルを考えたとき、集中荷重に対する弾性体の変形を図4(b)に示す。このとき、Timoshenko梁の理論よりせん断方向集中荷重 F が負荷された弾性体のせん断方向変位に対する等価剛性 K_e を図4(b)のように表すこととした。さらに、センサチップを埋めた弾性体を図5(a)に示す。本研究では、図5(b)に示すように弾性体がせん断方向に変形するとき、等価剛性の関係式として $k_c \ll K_e$ が成り立てば、起立カンチレバーが弾性体にならって変形するものとした。さらに、 $k_c \ll K_e$ が成り立つとき、弾性体に埋め込まれたセンサチップの起立カンチレバーヒンジ部の変形は、弾性体に埋め込まれていない起立カンチレバーがヒンジ部とプレート部の境界B点に集中荷重を受けたときの変形に近似できるものとし、ヒンジ部中立面からの距離 h に生じるひずみ ε を図5(b)に示す式で表した。このひずみ式を用いてセンサ出力である抵抗変化率を得ることができる。

続いて、弾性体に埋まった起立カンチレバーのせん断方向定常ひずみに対する変形を2次元有限要素法（以下、2D FEM）によって解析した。構築したモデルの解析メッシュを図6に示す。弾性体の物性値は従来研究でよく用いられているPolydimethylsiloxane（以下、PDMS）の物性値を用いた。使用した要素は4辺形および3角形2次元平面ひずみ要素、最小要素サイズは20 nm、要素数は起立カンチレバーがおおよそ5万、弾性体がおおよそ3万とした。変位境界条件として弾性体底辺のy, z方向変位を固定拘束し、弾性体上辺に $y=0.5 \mu\text{m}$, $z=0 \mu\text{m}$ を与えたとき、系全体に生じる第1主ひずみのコンター図を図7(a)に、ヒンジ部に生じる主ひずみの座標軸正方向とその値を図7(b)に示す。図7(b)より、弾性体に埋められた起立カンチレバーの場合、ヒンジ部長手（周）

方向に第1主ひずみ、法線方向に第3主ひずみが生じており、ヒンジ部に生じる第1主ひずみの傾向は図5(b)に示す式を用いて算出される値と同じ傾向を示すことが確認できた。また、弾性体のヤング率を100 kPaから2 MPaまで変化させたとき、ヒンジ部に生じる第1主ひずみの解析結果を図8に示す。図8に示す結果より、各ヤング率におけるヒンジ部端点たわみ量の誤差は5%以下であったにもかかわらず、ヒンジ部に生じる総主ひずみ量の2D FEM解析結果と理論値との誤差はヤング率が444kPaから変化するほど増加した。解析と理論値との間に生じた誤差の要因として、弾性体中のヒンジ部のひずみを表す式(図5(b))には埋め込まれた弾性体の物性値が含まれないが、2D FEM解析では、ヤング率の増加と共に弾性体変形時に生じる起立カンチレバー周囲の応力も増加したことが考えられる。

3. 製作・実験

製作した埋め込み型せん断ひずみセンサチップおよびセンサ素子である起立カンチレバーを図9に、センサチップを埋めた計測対象弾性体を図10に示す。本研究では、計測対象弾性体として底面が6 mm×6 mmで統一されたPDMS(ヤング率444 kPa)を用いた。

センサチップを埋め込んだ弾性体上面にステップ入力を与えたときのセンサの抵抗変化率の計測を行った。ピエゾ素子を用いて製作した加振器を含む実験セットアップおよび実験概要を図11(a)と(b)に示す。また、弾性体上面変位に対する各センサの抵抗変化率計測結果を、起立カンチレバーヒンジ部端点たわみ量に換算したときの各センサの抵抗変化率を図11(c)に示す。図11(c)に示す結果より、E1センサのヒンジ部端点の単位たわみ量に対する抵抗変化率は $3.42 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ となり、理論値 $2.47 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ との誤差は38%、E2センサは $6.50 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ となり、理論値 $2.47 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ との誤差は164%となった。この誤差の要因として、起立カンチレバー周辺のチップ構造が変形に影響したこと、加えて、カンチレバーの等価剛性が低いE2センサの方がE1センサより誤差が大きくなったことが考えられる。

また、弾性体や埋め込み型センサが系全体の動的応答特性に与える影響を明らかにするため、等価剛性を調整したセンサチップおよび弾性体を製作し、それぞれに対し掃引正弦波による変位加振を行ったときのセンサ応答を計測した。はじめに、パリレン膜の有無によるセンサ素子の等価剛性の変化について確認するため、弾性体に埋め込まれていないセンサチップの共振周波数を計測した。パリレン膜の成膜されていないセンサ素子の1次共振周波数の理論値は1.52 kHz、パリレン膜が1 μm 成膜されたセンサ素子の1次共振周波数の理論値は3.36 kHzである。センサチップに対し、掃引正弦波による変位加振を行った結果の一例を図12に示す。図12に示す結果より、共振周波数の理論値と実測値との間には14%の誤差があるものの、パリレン膜の有無によりセンサチップの共振周波数が大きく異なったため、パリレン膜の蒸着によってセンサ素子である起立カンチレバーの等価剛性が増加することを確認した。

続いて、センサチップを埋め込んだ弾性体に対し、100Hzから2 kHzの正弦波による変位加振を行ったときのセンサ応答および入力信号に対する位相差の計測を行った。弾性体高さを調整して等価剛性を変化させた弾性体に対して同寸法のセンサチップを埋めたとき、弾性体上面の単位変位量に対する各センサの抵抗変化率と入力信号に対する位相差を図13に示す。図13に示す結果より、E1センサでは2 kHz以下で共振応答は計測されなかったが、E4センサでは900 Hz付近で共振応答が計測された。よって、E1センサとE4センサはセンサチップの特性が等しく弾性体の寸法のみ異なることから、弾性体に埋め込まれたセンサの動的応答特性は弾性体によって変化すること、また、共振後は位相差を生じることから計測可能周波数帯域は弾性体の共振点以下であることが分かった。さらに、パリレン膜厚を調整して等価剛性を変化させたセンサチップを同寸法の弾性体に埋めたときの掃引正弦波加振に対する各センサ応答を計測した。10 Hz定常加振時の各センサの抵抗変化率を用いて正規化したE1, E2, E3センサの応答のゲインと入力信号に対する位相差を図14に示す。図14に示す結果より、E1, E2, E3の全てのセンサで2 kHz以下での共振応答は計測されず、センサ間で位相差も見られなかった。よって、埋められたセンサチップの等価剛性が弾性体の1/400以下であれば、センサチップの動的応答特性は計測に影響を与えないことが分かった。

4. 結論

本研究から、ヤング率1 MPa以下の弾性体に生じる動的せん断ひずみを計測可能な埋め込み型センサを設計する際、センサ素子の等価剛性が弾性体の等価剛性の $1/10^5$ 以下になるように寸法を決定すればセンサ素子が弾性体にならって変形するとみなしてセンサ応答を表現できること、加えて、センサチップの高さが弾性体高さの35%以下かつ弾性体のヤング率が500 kPa程度であればその誤差は40%以下となることが分かった。さらに、埋め込み型動的せん断ひずみセンサの計測可能周波数帯域は計測対象となる弾性体の寸法に依存し、センサは影響を与えないことが分かった。

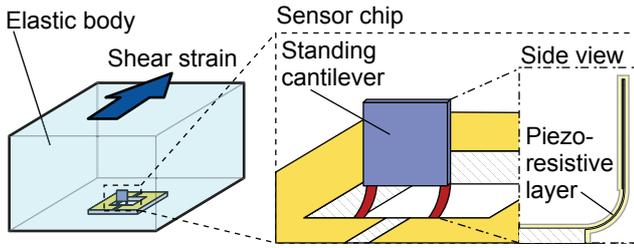


図1 埋め込み型せん断ひずみセンサの概要。

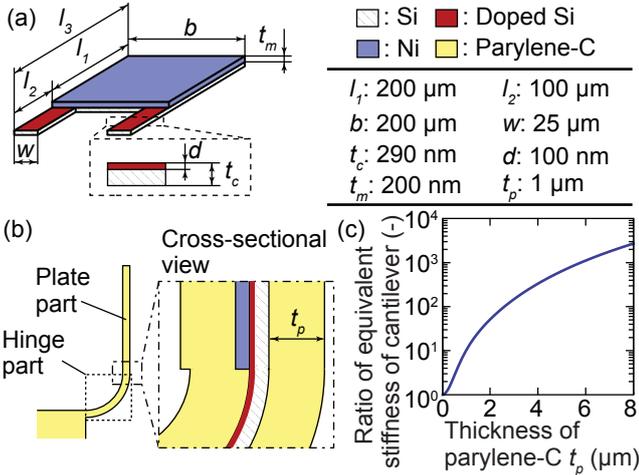


図2 (a) センサ素子となるカンチレバーの各部基準寸法, (b) パリレン膜の蒸着によって起立したカンチレバー, (c) 蒸着するパリレン膜の厚みによる起立カンチレバーの水平方向変位に対する等価剛性の変化。

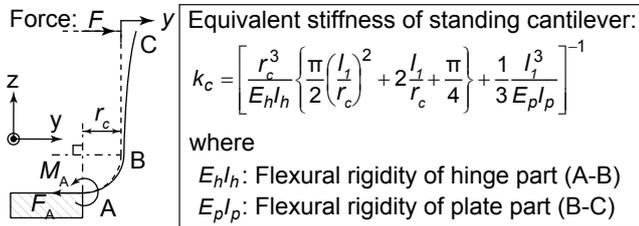


図3 起立カンチレバーのプレート部先端Cに集中荷重を受けるカンチレバーの変形と、起立カンチレバーの水平方向変位に対する等価剛性を表す式。

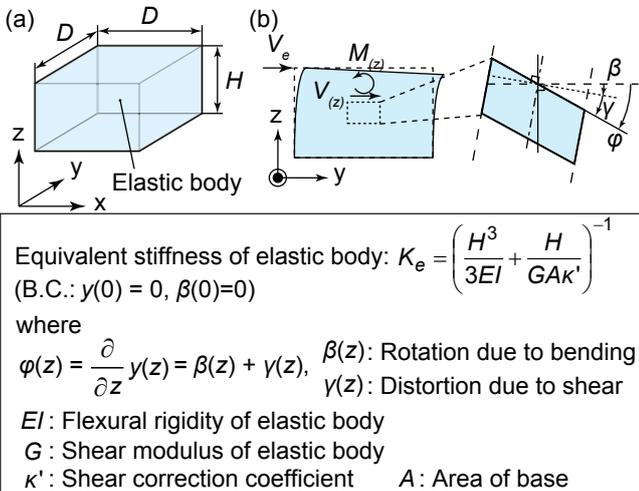
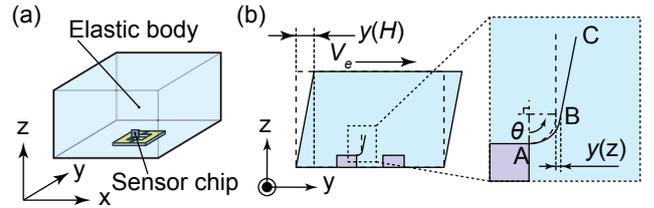


図4 (a) 弾性体単体モデル, (b) 境界条件が $y(0)=0, \beta(0)=0$ のとき、端点に集中荷重 V を受ける弾性体の変形と弾性体の水平方向変位に対する等価剛性を表す式。



Strain of hinge part (A-B): $\varepsilon = \frac{h}{E_h l_h} k_c r_c \cos \theta y(z)$

Sensor output (resistance change ratio):

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{r_c \pi / 2} \int_0^{\pi/2} (\pi_l - \pi_t \nu) E_{Si} \varepsilon r_c d\theta$$

where

h : Distance from neutral surface

ν : Poisson's ratio of Si E_{Si} : Young's modulus of Si

π_l : Longitudinal piezoresistive coefficient

π_t : Transverse piezoresistive coefficient

図5 (a) センサチップの埋められた弾性体モデル, (b) 境界条件が $y(0)=0, \beta(0)=\beta(H)=0$ のとき、端点に集中荷重を受ける弾性体とセンサ素子の变形図と、起立カンチレバーヒンジ部 (AB間) に生じるひずみ、およびセンサの抵抗変化率を表す式。

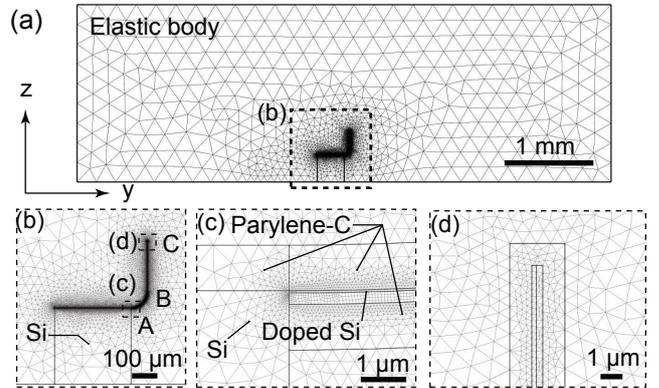


図6 2D FEM モデルの解析メッシュ

(a) センサチップの埋められた弾性体モデル, (b) センサチップ周辺, (c) ヒンジ部付け根 (A点) 周辺, (d) プレート部端点 (C点) 周辺。

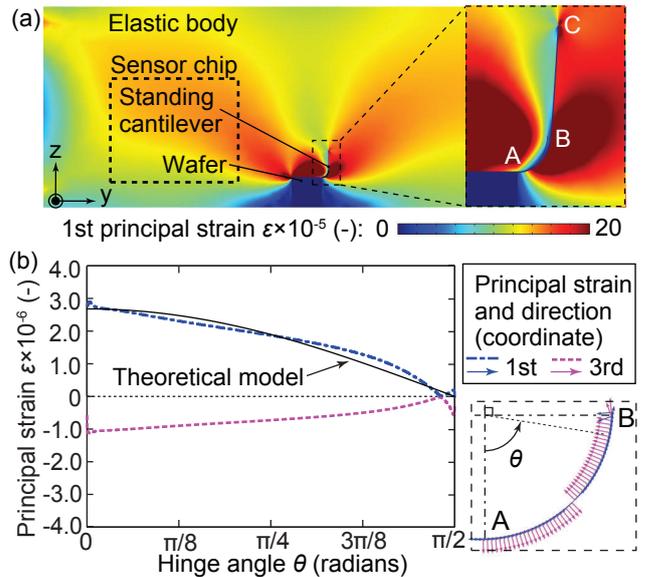


図7 (a) 2DFEM による弾性体中のセンサ素子の变形解析, (b) 弾性体中の起立カンチレバーヒンジ部に生じる第1主ひずみと第3主ひずみの値と発生方向の2DFEM 解析結果、および变形近似モデルにより算出した理論値。

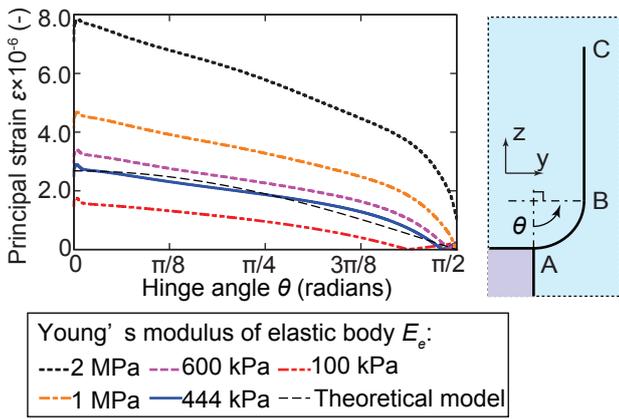


図 8 弾性体のヤング率に対するヒンジ部に生じる第 1 主ひずみの変化。

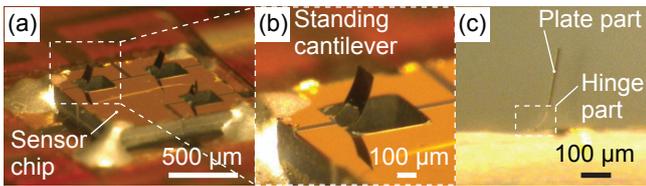


図 9 (a) 製作したセンサチップ, (b) 起立カンチレバー, (c) 起立カンチレバーを側面から観察した写真。

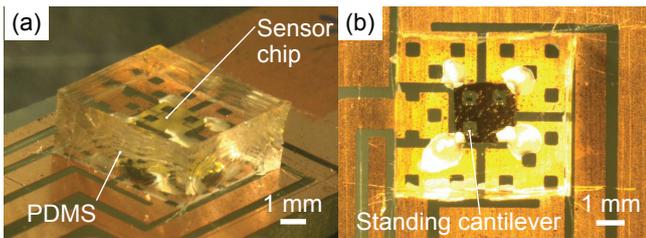


図 10 (a) センサチップが埋められた PDMS の外観, (b) センサチップが埋められた PDMS を上から観察した写真。

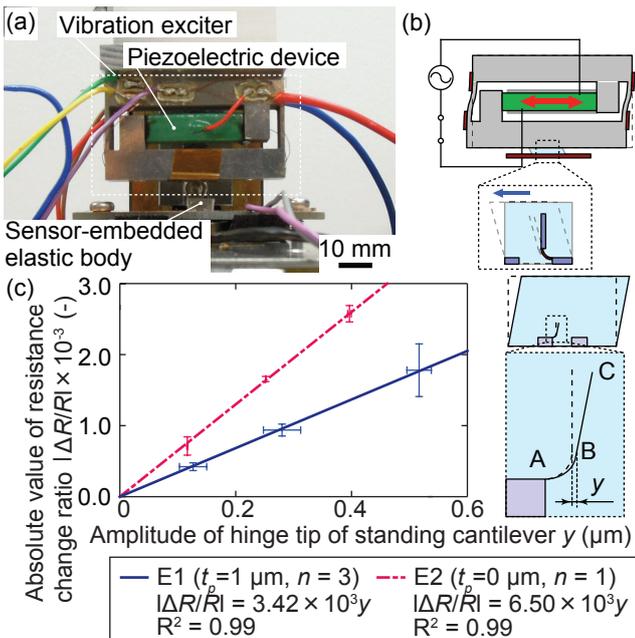


図 11 (a) 実験セットアップ外観, (b) ステップ入力に対する応答計測の概要, (c) 等価剛性の異なるセンサチップが埋められた弾性体にステップ入力を与えたとき, センサ素子のヒンジ部端点たわみ量に対する各センサ応答の計測結果。

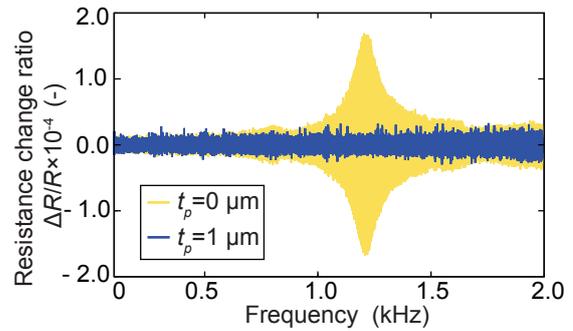


図 12 パリレン膜厚により等価剛性を变化させた, 弾性体に埋められていない各センサチップに対し, 掃引正弦波変位加振を行ったときの各センサ応答の計測結果. 等価剛性の低いセンサチップのみ, 1.2 から 1.3 kHz で共振応答が観測された。

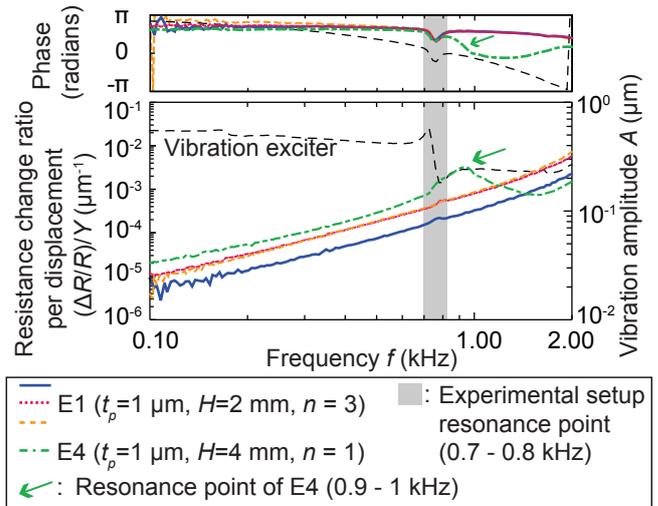


図 13 高さを調整して等価剛性を变化させた弾性体に対して同寸法のセンサチップを埋めたときの掃引正弦波変位加振に対するセンサ応答の計測結果. センサ応答のグラフは弾性体上辺単位変位量あたりのセンサの抵抗変化率の変化を表している. 弾性体寸法が変化することによって系全体の動的応答特性が変化している。

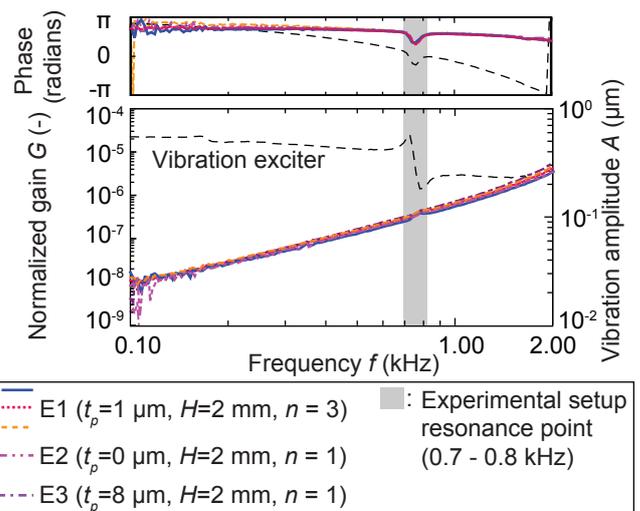


図 14 パリレン膜厚を調整して等価剛性を变化させたセンサチップを同寸法の弾性体に埋めたときの掃引正弦波変位加振に対するセンサ応答のゲインの比較. 得られた結果に対し, 10 Hz 定常加振時の各センサ応答を用いて正規化を行っている. センサチップの等価剛性が 1000 倍程度変化しても, 弾性体の等価剛性の 1/400 以下であれば, 系全体の動的応答特性に変化は見られなかった。