

論文 光学的手法による微細構造体の面内変位計測*

Optical Method for Measuring In-plane Micro Displacement of Micro-device

橋川 淳

Atsushi HASHIKAWA

In this paper, a novel method for measuring nanometer order in-plane displacement of mechanical element in MEMS device will be proposed. Present method is based on the measurement of reflected light intensity irradiated on the edge of measuring target, where the work stage is traversed in the direction of displacement of the mechanical element, under applying AC vibration parallel to the direction of displacement of the element. By applying this method, measurement of displacement under 10 nm can be achieved.

Key words : MEMS, Optical measuring method, Vibration, Edge, Micro displacement

1. 緒言

半導体プロセスを応用してシリコン基板上に微細加工を施すMEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を応用した製品が実用化され始めている。回路をはじめ、センサやアクチュエータなどの微細構造体の集積化により小型化・低コスト化が図れる特徴を生かし、情報通信分野、自動車分野、医学・バイオ分野など広い分野への応用が進められている¹⁾⁻⁵⁾ これら微小デバイスの実用化が進むにつれ、開発、製造、検査等に必要な計測技術の高精度化が要求されてきている。

特に加速度センサや光スイッチ素子などの可動部分を有する微小デバイスにおいては、面内の静的変位をナノメートルオーダーの高精度で簡便に計測できることが必要となる。従来の計測方法を検討してみるとSTM, AFMはサブナノメートルオーダーの精度を有するが、測定範囲が限られ、また微細形状計測ではプローブ形状が無視できなくなり、被測定形状とプローブ形状とのたたみこみ積分の形で計測されるため、真の形状計測ができない。光の波長を測長の基準としたモアレ法等の光学干渉を利用した方法は、広い測定領域で面内変位が可能であるが、位相の高精度計測が必要でありナノメートルオーダーの計測を簡便に行なうことは容易ではない⁶⁾。

本研究では、微小な構造体の面内静的変位をナノメートルオーダーの精度で簡便に計測できるようにするため、照射したレーザー光の反射光量変化を検出することにより、構造体のエッジ部を検出し、構造体の変位を算出する新しい手法を提案する。従来静的変位を計測するには、レーザー光照射位置を移動させ反射光量のDC変化が設定値を超えた位置を構造体のエッジ部とする方法が用いられている。しかしこの手法では電気

ノイズ、レーザー光量変化など外乱の反射光量への影響が大きく、受光光量が変動して計測精度を悪化させる。また、この影響を低減させるため計測装置、測定環境に制約が必要となる。そこで、レーザー光を照射した微小デバイスを移動させながら、構造体の固有振動数より十分低い周波数で移動方向と平行に振動させ、反射光の振動周波数成分のみを抽出して得られた振幅変化からエッジ部を求めることで、外乱の影響を除去することができる。構造体の静的変位発生前後に、上記手法で求めた対向する構造体間のエッジ間隔を検出し、その差を求めることで相対変位量を算出することができる。

この手法について計測可能性の検討を行ない、顕微鏡下で変位計測できる装置及び演算ソフトを試作した。検証のため実際にマイクロマシニングにより試作したMEMSデバイスを用いて計測を行ない、理論値と実測値の比較を行なった結果について述べる。

2. 計測原理

Fig. 1に本計測法の検出部の構成を示す。顕微鏡を通したレーザー光を対物レンズで収束し、ステージに固定された試料内の構造体を照射する。構造体からの反射光は再び対物レンズを通りビームスプリッタにより反射され、受光素子上に収束する。構造体を固定したステージには、構造体の固有振動数より十分低い周波数で水平方向微小振幅のサイン波と、同じ方向でサイン波の周波数よりも低い周波数で振幅の大きい三角波を重畳した駆動信号が印加される。これにより、構造体はステージと同じ周波数で振動しながら移動する。レーザー光は固定されているため、構造体の照射位置が

* (社)精密工学会の了解を得て、「精密工学会誌」Vol.70, No.4, 2004より転載

振動しながら順次移動する。この光学系から得られる光量変化を用いて構造体のエッジ部を検出し、構造体が静的に変位する前後に同じ位置で構造体1-2間の距離変化を検出し、この差から相対変位として計測する。

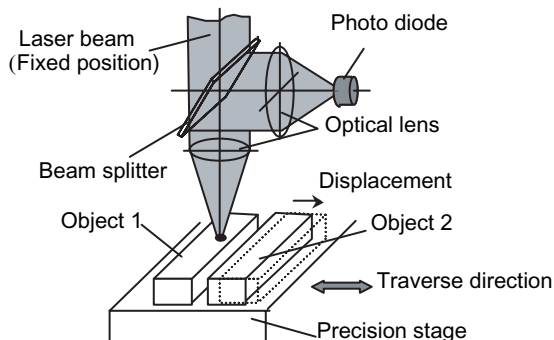


Fig. 1 Schematic view of the optical system

次に、この変位計測の原理を、レーザービームが構造体を照射する面積の変化から述べる。Fig. 2は本測定法のレーザービーム照射部を簡略化して描いたものである。構造体から反射する光量はこの面積にレーザービーム内の光量分布と構造体の反射率を乗じたものとなる。

位置を固定したレーザービームに対し、構造体は振幅 a 、周波数 f_0 で x 軸方向に振動しながら移動する。移動量 $x=0$ でビーム外周が構造体に接したときの接点位置を O とする。構造体が x だけ移動したとき、レーザー光が構造体を照射する面積 S_0 は

$$S_0 = \frac{r^2}{2} (\theta - \sin \theta)$$

ここで、 r : レーザービーム半径、 $\theta = \angle PQR$

さらに、

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{r-x}{r} \quad \therefore \theta = 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{x}{r} \right)$$

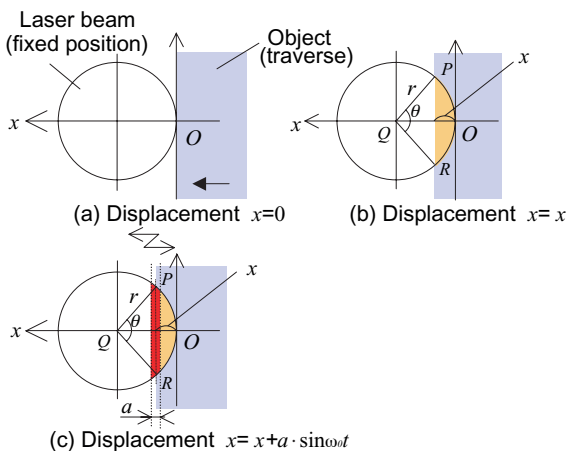


Fig. 2 Geometrical model for edge detection

従って照射面積 S_0 は

$$S_0 = \frac{r^2}{2} \left[2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{x}{r} \right) - \sin \left\{ 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{x}{r} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

この S_0 は、振動させずに移動した時、移動量 $x=x$ で照射される面積を表す。

本計測法では、構造体は振幅 a 、周波数 f_0 で水平方向に振動しながら同じ水平方向に移動するため、時刻 t における面積の瞬時値 S_1 は

$$S_1 = \frac{r^2}{2} \left[2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{x + a \cdot \sin \omega_0 t}{r} \right) - \sin \left\{ 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{x + a \cdot \sin \omega_0 t}{r} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$

以上より、構造体を振動させながら振動と平行方向に移動させたときの面積のAC成分は、レーザー光が構造体を照射する面積の、時刻 t における瞬時値と平均値の差で表される。平均値は $x=x$ での照射面積 S_0 に等しいから

$$S_{AC} = S_1 - S_0 \quad (3)$$

となる。

上式 (1), (2), (3) で構造体に振幅 $a=0.1 \mu\text{m}$ 、周波数 $f_0=20 \text{ Hz}$ のサイン波と、振幅 $3 \mu\text{m}$ 、周波数 0.2 Hz の三角波を重畳した駆動信号を印加し、振動させながら水平移動したとき、 S_0 、 S_1 、 S_{AC} の時間変化の計算結果を Fig. 3 に示す。 S_1 は S_0 の波形に構造体の振動による光量変化が重畳した波形となる。この振動周波数成分のみを取り出した、面積変化のAC成分の波形が S_{AC} である。構造体とレーザービームの位置関係と、面積のAC成分波形 S_{AC} との関係を図 4 に示す。図中濃色部分はレーザービームの照射範囲内で構造体のエッジ部分が振動する領域である。この部分の幅はサイン波の振幅 a 一定で、面積はエッジ部分がレーザービームと交差する長さで決まり、レーザービームと構造体の位置関係によりこの値は変化する。この値の変化が面積のAC成分波形 S_{AC} となる。図より、 S_{AC} は $x=1.5 \mu\text{m} = r$ すなわち構造体のエッジ部がレーザービームの中心位置にあるときに最大となる。

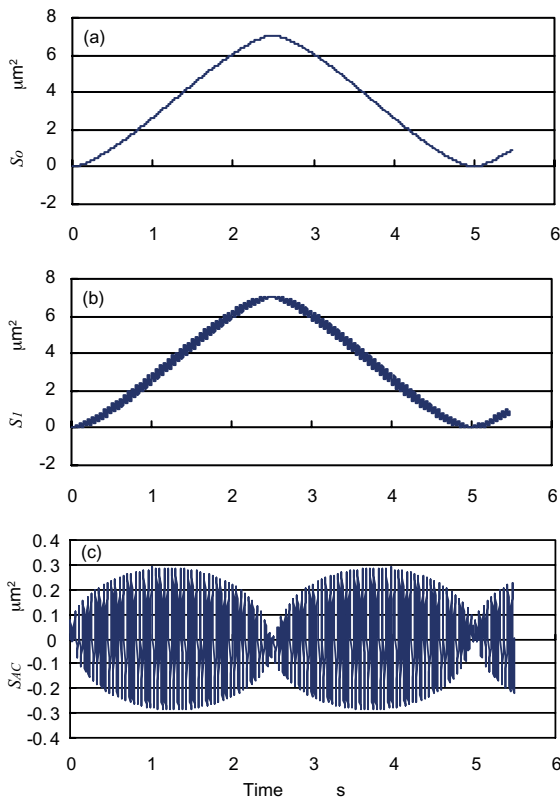


Fig. 3 Simulated result of (a) S_0 , (b) S_I , and (c) S_{AC}

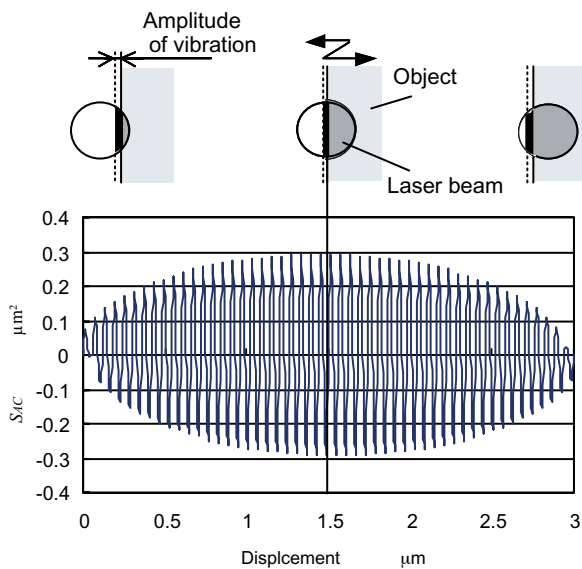


Fig. 4 Relation between beam position and S_{AC}

構造体から反射するレーザー光量変化はこの面積変化にレーザービーム内の光量分布（通常は中心部強度が高いガウス分布）と構造体の反射率を乗じたものとなる。つまり、反射光量のAC成分が最大となる位置を検出できれば、構造体のエッジ部を検出できることになる。

上記のようにして構造体のエッジ部を検出できるこ

とが分かったが、従来、レーザー光を照射した構造体を振動させることなく移動し、反射光量を直接検出し、その値が設定値以上変化したときエッジ部と判定する手法が用いられている。この手法と比較した、本計測法の外乱に対する優位性を以下に述べる。

計測時の外乱は、光源であるレーザー光の光量変動、外部振動、空気揺らぎ等があるが、今これら外乱を光量変動として組み込んだと仮定し、その変動をサイン波成分として加えるものとする、受光光量 I は

$$I = S \cdot R \cdot (I_0 + I_1 \cdot \sin \omega_1 t) \quad (4)$$

のように表される。ここで、 S は照射面積、 R は構造体表面の反射率、 I_0 は平均照射光量、 I_1 は外乱による光量の変動分、 $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ 、 f_1 は外乱の変動周波数である。振動なし、振動あり（振動周波数20 Hz）のときの照射面積の式(1)、(3)を用いて、それぞれの場合の受光光量 I_{DC} 、 I_{AC} は

$$I_{DC} = S_0 \cdot R \cdot (I_0 + I_1 \cdot \sin \omega_1 t) \quad (5)$$

$$I_{AC} = S_{AC} \cdot R \cdot (I_0 + I_1 \cdot \sin \omega_1 t) \quad (6)$$

と表される。いま仮に、それぞれの場合に変動の周波数を1.5 Hz、 I_1 が I_0 の10%であるとしたとき、式(4)は

$$I = S \cdot R \cdot I_0 \cdot (1 + 0.1 \sin \omega_1 t)$$

となる。式(5)、(6)について、 $I / (R \cdot I_0)$ を計算した結果をFig. 5に示す。

(a)振動なしで、検出値が設定値以上変化したときエッジ部と判定する場合には外乱によって判定位置が変動し、エッジ位置を誤検出する可能性がある。(b)振動ありの場合も検出値波形のままではエッジ位置検出に用いる振幅の最大位置が変動するが、(c)(b)の波形をフィルタリング処理して、外乱である1.5 Hzの影響を除去すれば、安定して振幅のピーク位置が判定でき、エッジ位置が検出できる。今回は、このフィルタリングにロックインアンプを用いて振動周波数信号を参照信号とした同期検波を行ない、参照信号と等しい周波数成分のみを直流成分として検出する

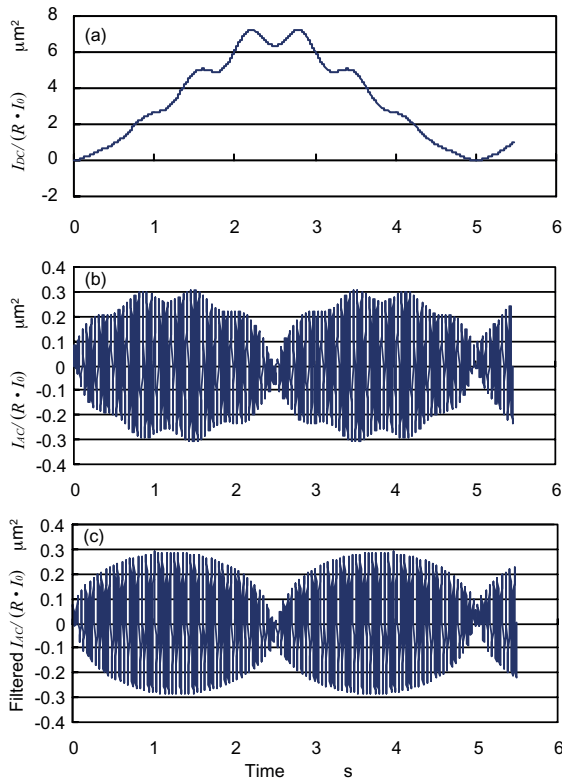


Fig. 5 Comparison of (a) $I_{DC} / (R \cdot I_0)$, (b) $I_{AC} / (R \cdot I_0)$ and (c) Filtered $I_{AC} / (R \cdot I_0)$ under the light intensity fluctuation

Fig. 6により前述のエッジ検出手法を用いて構造体の変位量を求める方法を説明する。図にはレーザービームと対向する構造体との位置関係及びロックインアンプ出力信号を対応させて示す。なお、レーザービームは固定であるが、Fig. 6ではステージが移動することによりレーザービームが構造体のエッジ部を照射した時の位置関係を、静的変位発生前後で重ねて描いてある。

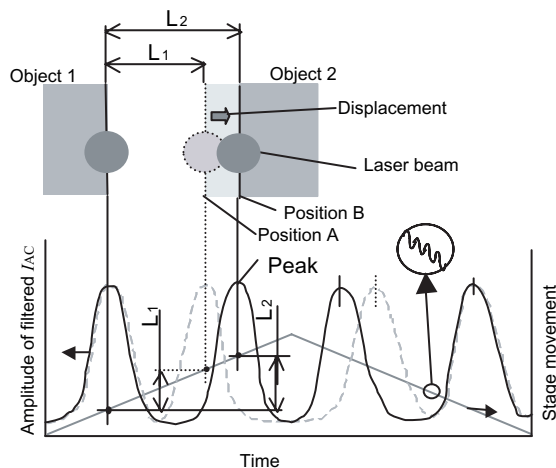


Fig. 6 Schematic diagram of measuring displacement

前述のように、構造体は振動しながら振動方向と平行方向に移動するが、振動周波数は可動構造体の固有振動数より十分低いため、共振による振動が発生することなく構造体の移動量はステージ移動量と同様である。このため、構造体1と2は静的な位置関係を保ったまま振動しながら移動する。Fig. 6で構造体1に対し変位可能な構造体2が位置Aにあったとき、試料を振動させながら同じ方向に移動することで得られる受光量信号をロックインアンプに入力すると、振動周波数成分を参照信号とした同期検波を行ない、図中破線に示すような振動周波数成分の振幅に応じた出力電圧が得られ、構造体のエッジ部に対応してピークが現れる。構造体1のエッジ部に対応したピークが得られる時刻と構造体2のエッジ部に対応したピークとなる時刻の時間間隔から、この間にステージが移動する距離 L_1 が求められる。構造体2が位置Bに変位したとき、同様にして構造体1と構造体2のエッジに対応したピーク間のステージ移動距離 L_2 が求められる。得られた L_1 と L_2 の差をとることでこの間の構造体の相対変位が算出できる。

なおステージ移動信号である三角波は、構造体が移動した時、レーザービームが照射する領域が構造体1と2のエッジ部を含み、反射光量の振動周波数成分がピークを持つことができるよう、移動開始位置と振幅を前もって設定する。

3. 実験結果

3.1 実験装置

Fig. 7に、実験に用いた装置の概観を示す。光源であるHe-Neレーザーのビームを光ファイバで導光し、NDフィルタ、コリメートレンズ、ビームエキスパン

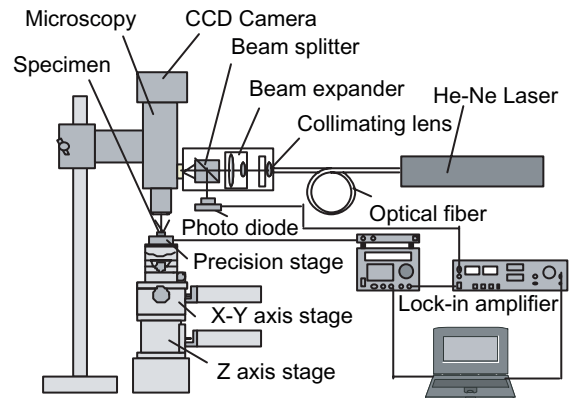


Fig. 7 Experimental apparatus

ダで光量調節，ビーム径調節を行なう．レーザ光はさらにビームスプリッタを通過して顕微鏡に入射され，倍率20倍の長作動距離対物レンズを通してビーム径約3 μmに収束されて試料を照射する．試料上の計測位置，ビーム照射状態はビームスプリッタを通してCCDカメラで常時観察が可能である．試料からの反射光は対物レンズを通過し，ビームスプリッタで反射されて受光素子であるフォトダイオード上に収束する．試料はPZTで駆動されるステージ（PI製 P-753）に固定され，ステージコントローラからの駆動信号によって分解能0.5 nmの移動が可能で，約10 μmの計測範囲が得られる．駆動信号は，0.2 Hzの水平移動信号（三角波）に周波数20 Hz振幅0.1 μmのサイン波を重畳した．得られた受光光量信号はロックインアンプに入力され，ステージ振動信号である20 Hz成分を参照信号として同期検波を行ない，参照信号と等しい周波数成分のみを直流成分として検出する処理を行なった後，PCに入力される．PCには同時にステージ移動信号も入力される．なお，PZT駆動ステージの下部にはZ軸電動ステージとX-Y軸電動ステージが設置され，前者は顕微鏡のフォーカス調整に，後者は可動距離が±6.5 mmあり，試料の広い範囲で計測できる．

Fig. 8にPCで処理する変位量算出のためのフローを示す．計測ソフトには，ロックインアンプから受光光量の振動周波数成分出力，ステージコントローラからステージ水平方向移動信号が0.5 ms間隔で入力される．受光光量信号を用いて二つの構造体のエッジに対応するピークを検出し，二つのピーク間の時間を計測する．この時間間隔とステージ水平方向移動信号からこの間のステージ移動量を算出する．得られた移動量を記憶する．変位発生の前後も同様の処理を行ない，記憶したステージ移動量の差を求め，変位量計測値として表示する．

また，以上の計測フローの他，PC上でX-Y軸電動ステージの移動を制御する駆動信号を出力するようなプログラムとし，試料上の計測位置，計測回数をあらかじめ指定し，広範囲での自動多点計測をできるようにした．

3.2 較正

変位量計測値の較正に用いた基準スケール（ニコン製）の形状をFig. 9に示す，この基準スケールは，ガラス基板にクロム膜を蒸着したものである．

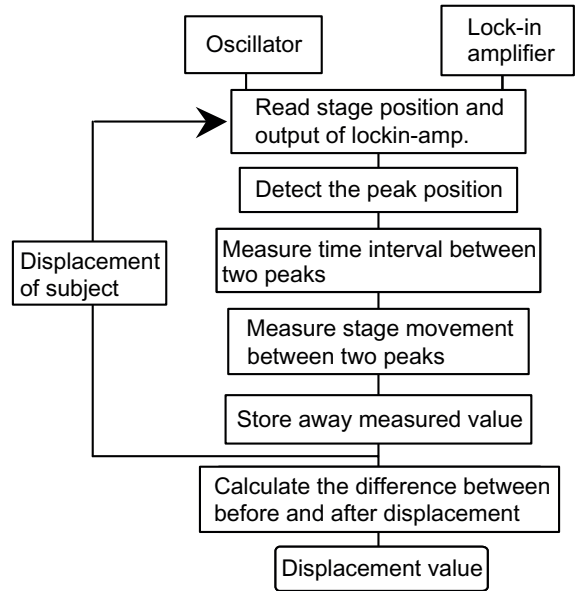


Fig. 8 Software flow diagram

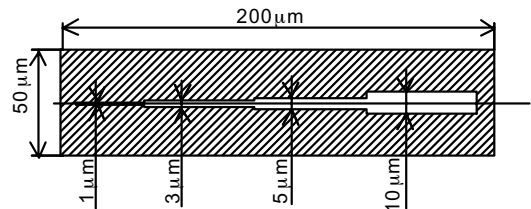


Fig. 9 Calibration scale

本計測装置の計測手順と同様に基準スケールの異なる間隔2点で較正を行なった．本計測装置では構造体の変位する前後に同じ計測位置で求めたエッジ間の距離の差から構造体の変位量を求めている．そこで，計測装置の較正もこれに相当する手順で行なった．基準スケール上の2ヵ所，3 μm間隔部分と5 μm間隔部分で本計測装置による計測を行ない，その差である変位量計測値が2 μmと表示されるよう計測ソフト内で設定した．さらに1 μm間隔部分と5 μm間隔部分，10 μm間隔部分と5 μm間隔部分で計測を行ない，Fig. 10の結果を得た．この結果，基準スケール間隔の差と計測値の間には，図に示すように傾き1の直線関係が得られ，較正值と計測値の対応付けができた．

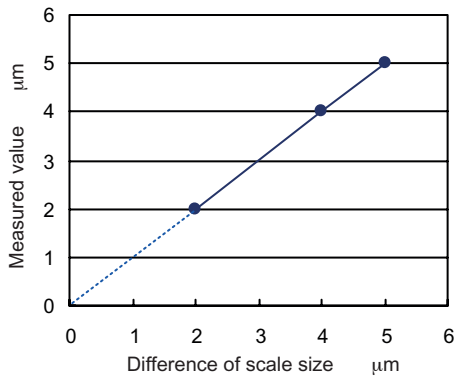


Fig. 10 Result of calibration

3.3 検証

これまでに、微小な構造体の変位を検出する手法を提案してきたが、実際に計測を行ない、その妥当性を検証した。計測対象として必要な要件は、安定して変位量を発生できること、変位量が制御可能なこと、計算で変位量を求めることができ、計測値との比較が可能なことなどがあげられる。これを実現するため、実際にマイクロマシニングにより櫛歯電極を有するデバイスを製作し、櫛歯電極間に直流電圧を印加して電極間隔を変化させる方法を用いた。Fig. 11に示すデバイスのモデル図において、電圧印加時に電極に加わる力は、電圧により発生する静電力と、デバイス構造によるバネ力である。これらの釣り合いから以下の式が得られる。

$$k \cdot x = \frac{1}{2} \epsilon \cdot S \cdot V^2 \left\{ \frac{1}{(d_1 - x)^2} - \frac{1}{(d_2 + x)^2} \right\} \quad (7)$$

ここで、 x は電極変位量、 d_1 、 d_2 は初期電極間隔、 V は印加電圧、 ϵ は誘電率である。 S は電極面積、 k はバネ定数で、それぞれ設計値である。この式を用いて直流電圧を印加した時の櫛歯電極の変位を計算した。変位の計算に用いた各パラメータ値は、 $d_1=3 \mu\text{m}$ 、 $d_2=9 \mu\text{m}$ 、 $\epsilon=8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 、 $S=9.5 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 、 $k=12 \text{ N/m}$ である。

このデバイスを用い、印加電圧差を変化させて電極間隔の変化量を本計測法で計測した。この結果、Fig. 12に示すように、上記計算式から算出した変位量計算値と計測値はよく一致し、本計測法の妥当性が検証できた。

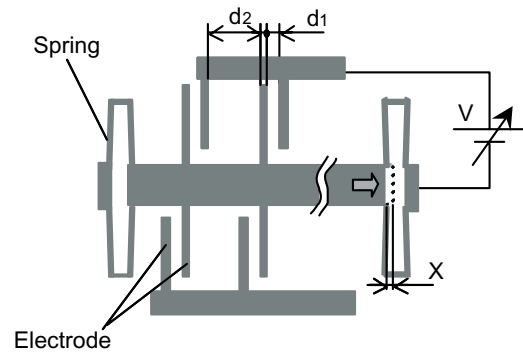


Fig. 11 Tested device

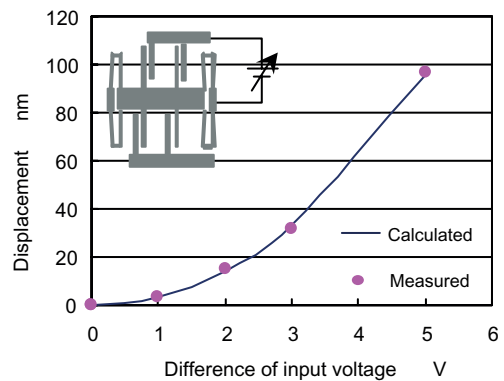


Fig. 12 Comparison of measured value and simulation

さらに、本計測法の繰り返し計測時のばらつきを計測した。前記のデバイスを用いて、電極に印加する電圧差を3 Vとし、10回の繰り返し計測を行ない、その計測値を評価した。この計測での計測値の 3σ は5 nm以下で、10nmオーダの計測を行なえるレベルであると判断できる。

4. 考察

本論文で扱った、静的変位を測定することに適した計測手法は少ないが、MEMSデバイスの電気信号と構造体の変位量を高精度で対応付けることは、設計値、製造条件の決定に重要であり、意義のあることと考えられる。

検出精度に影響の大きい外乱について、計測原理の項で述べたように、サイン波で代表した外乱が発生したときの受光光量は式(6)のようになり、外乱成分により変調がかけられた形となる。このため、検出信号の周波数特性は、基本波形に f_1 間隔のサイドローブを有する波形となる。この波形にフィルタリングを行なうが、フィルタ特性の帯域幅が f_1 よりも小さければ、

フィルタリングを行なった結果の受光光量信号は f_1 成分を含むことは無いため、外乱の影響を受けることなく、エッジの検出ができる。今回、このフィルタリングにはロックインアンプを用いて振動周波数を参照信号とした同期検波を行なうことにより、1.5Hz程度の帯域幅が得られるため、通常の実験室レベルで発生する商用電源からの電気ノイズ、レーザ光量変動など振動周波数を含まない外乱であれば排除できるものと考えられる。

今回変位発生前後のエッジ間隔の差から求めることのできる変位は、対向する構造体の相対変位であり、絶対変位計測には対応していない。これは、エッジ検出時に用いる反射光量変化がエッジ部の形状、反射率の影響を受け、光学的に検出したエッジ位置と幾何学的なエッジ位置に誤差が発生するためである。今回目的とした構造体間の相対変位を求めるときにはこの誤差は相殺されるため問題とはならないが、絶対変位計測に対応するには今後新たな検討が必要である。

また、本計測法の精度・分解能は、現在ステージの精度・分解能によるところが大きい。精度に影響の大きいステージ移動量の検出はステージに印加する電圧の傾きから、分解能はステージ駆動回路の分解能からそれぞれ決定される。さらに高精度化するためには、光軸方向の分解能、計測精度の高い干渉計で計測したステージ移動量を用いて演算することが考えられる。

5. 結 論

微小な構造体の面内静的変位を高精度で簡便に計測するため、光学的な手法の検討を行ない、以下の結果を得た。

- (1) レーザ光を照射した微小デバイスを振動させな

が同じ方向に移動し、反射光の振動周波数成分の振幅から対向する構造体間のエッジ間隔を変位発生前後に計測し、その差を求めることで構造体の変位量を算出することができる。

- (2) この手法は、振動なしで得られた構造体からの反射光量を用いてエッジ部を検出する方法と比較して、外乱に対する優位性がある。
- (3) この手法の検証のため、マイクロマシニングにより試作した微小デバイスを用いて実測値と理論値の比較を行なった結果、両者はよく一致し、この計測手法の妥当性が確認できた。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、有意義なご議論、ご助言を頂いた、(株)デンソーの鈴木康利氏、酒井峰一氏に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 太田 実：「自動車工学シリーズ 自動車用センサ」, 山海堂(2000)
- 2) 国土交通省：自動車総合安全情報, 先進安全自動車 (ASV) の紹介
- 3) 原田宗生：半導体プロセスによるマイクロ加工, 精密工学会誌, 68, 2 (2002), p.185.
- 4) 鈴森康一：マイクロ静電アクチュエータ, 精密工学会誌, 68, 5 (2002), p.649.
- 5) 江刺正喜：MEMS技術で描く夢, 日経マイクロデバイス, 45 (2003), p.137.
- 6) 谷田貝豊彦：「応用光学—光計測入門—」, 丸善 (1988)

<著 者>



橋川 淳

(はしかわ あつし)

(株)日本自動車部品総合研究所
研究2部

パワーエレクトロニクス関連のシステム開発・解析, 計測関連の業務に従事