

MEMSマイクロミラーの簡易ねじり強度試験の開発*

泉 聡志^{*1}, 山口 真^{*2}, 笹尾邦彦^{*2}, 酒井信介^{*1}

Development of a simple test method for torsional strength of MEMS micromirror

Satoshi IZUMI^{*3}, Makoto YAMAGUCHI, Kunihiko SASAO, Shinsuke SAKAI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

MEMS micromirrors have been used in optical switches and scanning devices. In these kinds of applications, the beams supporting the micromirror are twisted and deformed to a large extent. Consequently, these single crystal silicon beams have failed catastrophically from brittle fractures. In this paper, a simple fracture test method for the torsional strength of MEMS micromirror has been proposed. This method can be realized through the improvement of the previously proposed bending-torsion combined loading test with respect to the specimen dimensions and loading configuration. The developed method was applied to the actual specimens and it was obtained that shape parameter is 4.40 and scale parameter is 1575MPa. From the observation of fracture initiation point, it was found that the torsional fracture has taken place competitively at the sidewall subjected to high stress and the notching region involving high etching damage. Therefore, the proposed simple torsional test realizes the evaluation of the torsional strength of MEMS micromirror, which is governed by inhomogeneous defect and stress distributions.

Key Words : Fracture Mechanics, MEMS, Brittle Fracture, Material Test, Torsion, Finite Element Method, ICP Etching

1. 緒 言

MEMS (Microelectromechanical system)マイクロミラーは、スキャニングデバイス、プロジェクタ、オプティカルスイッチなどに用いられている⁽¹⁾。マイクロミラーを支えているはりの部分は、動作中において、ローレンツ力により大きくねじられる。その結果、単結晶シリコンのはりは脆性的に破壊する。よって、このようなねじりを受けるはりの破壊強度のような機械的特性を明らかにする必要がある。現在まで、多くの研究者がMEMSの機械的特性に関する研究を行ってきたが、そのほとんどは曲げ試験⁽²⁾⁻⁽⁸⁾や引張試験⁽⁹⁾⁻⁽¹⁵⁾であった。ねじり試験⁽¹⁶⁾の提案もあるが、機構が複雑で簡易な評価が出来ない。そこで、泉ら⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾は実機を模擬した試験片について、曲げとねじりの応力場の混合した試験を行う曲げねじり混合試験を提案し、ねじり破壊強度の評価を試みた。その結果、ノッチングといわれる高ダメージ領域からの破壊が支配的であることを示した。また、有限要素法解析(FEM)により、純ねじり応力場よりも、曲げねじり混合試験の方が厳しい応力状態に

あることから、曲げねじり混合試験の結果をマイクロミラーの破壊強度として用いることで安全側への代替評価ができることを示した。しかしながら、エッチングプロセスの改善により、ノッチングダメージが低減すると、提案された曲げねじり混合試験にはいくつかの問題が生じる。また、ねじり応力場の再現性には課題が残されている。

本研究の目的は、提案された曲げねじり混合試験の問題点を改良することによって、新たに、簡易ねじり強度試験手法を確立することにある。

2. 前提提案手法の問題点と改善点

前報⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾では、図 1(a)のようなレバー状の試験片形状を提案した。前報での寸法を表 1 上段に示す。図 1(b)のように、A点から離れたB点を押込むことにより、はりの部分にモーメントを負荷する曲げねじり混合試験を行った。破壊応力は有限要素法解析により見積もった。ノッチングダメージが極めて大きいICP-RIE (Inductively-Coupled Plasma Reactive Ion Etching) で作成したため、すべての破壊はノッチング部を起点に生じること破面観察により確認した。ノッチングとは、エッチング作成パターン終端部であるSOIウェーハの表面シリコンと酸化膜との界面に形成されるダメージのことであり、図 1(b)のように、はりの側壁部のエッチング

*原稿受付 2005年00月00日

^{*1}正員, 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2}非会員, 東京大学大学院工学系研究科

E-mail: izumi@fml.t.u-tokyo.ac.jp

終端部（エッチング方向は図中下から上）に存在する．SOIウェーハ上のプラズマ中に形成されるイオンシースによって，プラズマ中の電子はウェーハ表面までしか到達しない．そのため，電子は幅の狭い作製パターン底部まで侵入していくことが難しい．その結果，作製パターンの底部は陽イオンにより正にチャージアップされ，エッチング種であるイオンが反発し曲げられて，パターン側壁に入射しダメージを与える⁽¹⁹⁾．一般にノッチングが一番大きなエッチングダメージとされている．よって，前報では，ノッチング部の最大第一主応力で破壊応力を評価した．

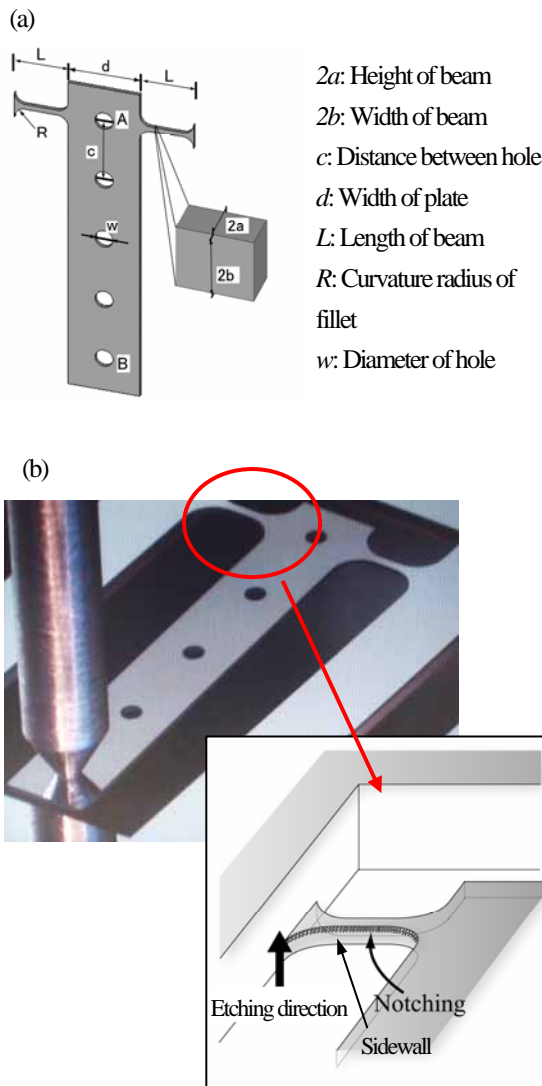


Fig. 1 (a) Schematics of designed specimen (b) Experimental setup and illustration of the notching region

Table 1 Dimensions of specimens [mm]

	L	d	$2a$	$2b$	c	R	w
Previous work	2	2	0.15	0.24	1.875	0.72	0.5
Proposed dim.	1.5	2	0.1	0.1	1.875	0.3	0.5
This work	1.5	2	0.1	0.15	1.875	0.3	0.5

2・1 ねじり応力分布の再現性の問題点と改善手法の提案

前報⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾の曲げねじり試験の第一の問題点は，ねじり応力場との応力分布の不一致にあった．破壊する可能性のあるノッチング部に沿ったはりのエッジ部を図2のように経路（以降path）A, Bと定義する．path A, Bは図2中左側のフィレット部（F1）のはじまりを原点とし，右側のフィレット部（F2）を終点とした経路とする．曲げねじり試験及びねじり試験を行うと，フィレット部（F1, F2）に応力集中が生じる．F1側のフィレット部の応力分布はねじり試験と曲げねじり試験ではほぼ一致するが，F2側では，path Bの応力分布が一致せず，曲げねじり試験ではフィレット部の広範囲に高応力が分布してしまった．

また，ノッチングフリープロセスの導入により，ノッチング部のダメージが低下すると，ダメージは小さいが，応力がノッチング部より大きいはりの側壁部分からの破壊が生じる可能性がある．このような問題

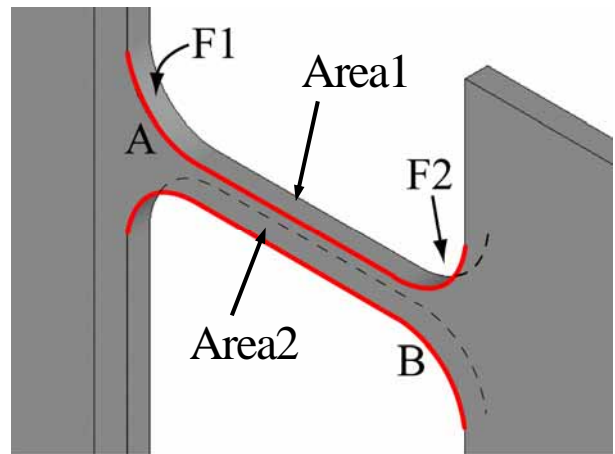


Fig. 2 Schematics of beam subjected to torsional or combined loading. Definitions of area and path are shown

を前報は想定しておらず，新しく検討が必要である．

応力分布の違いの問題を解決するために，本論文では試験片の形状の変更を提案する．具体的には，はりの断面形状を正方形とするため $2a=0.1$, $2b=0.1$ mm とする． $2a$ を 0.1mm にしたのは，標準的な SOI ウェーハを使うことを想定しているためである．また，微小化に合わせてフィレット部の曲率半径 R を 0.3 に設定した．提案する形状を表1中段に示す．

改良の結果を有限要素法で検証した．まずは，ノッチング部の応力分布の違いを検証するために，前報同様ロードファクターPDF（破壊確率の分布に対応）をねじり荷重下のものと比較した．ロードファクターPDFは前報で提案した局所的な破壊確率の指標で，式(1)で与えられる

$$PDF = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^m \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 m はワイブル分布の形状母数で、ここでは前報の結果から 5 を用いた。 σ_{\max} は考慮している経路の最大応力である。

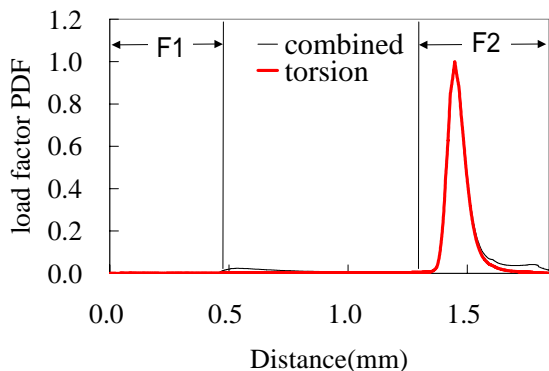


Fig. 3 Load factor PDF along path B (notching region) in the case of combined and torsional loadings

path A に関しては、前報同様、提案手法の曲げねじり混合試験の PDF はねじり荷重下の分布とほぼ一致する。path B に関するロードファクターPDFを図3に示す。横軸の原点は図2のフィレット F1 の始まりの位置を示す。前報と異なり、ロードファクターPDFが

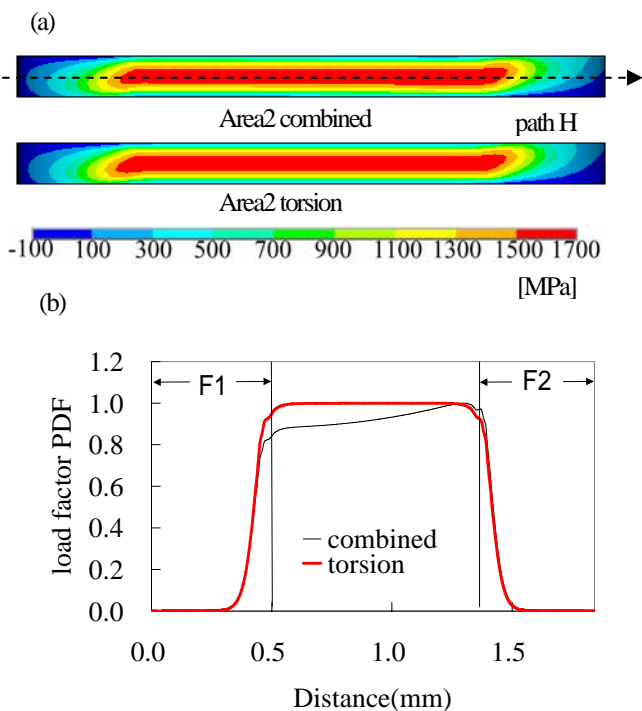


Fig. 4 (a) Stress contours of combined and torsional test on the area 2 shown in Fig.2. (b) Load factor PDF along path H.

ほぼ一致することがわかる。様々な形状の応力解析を検討した結果、はり幅(2a)とはり高さ(2b)が等しく、フィレット径 R が 0.3 mm 以上大きい場合、ロードファクターPDFが一致することがわかった。

次に、はりの側壁の応力分布について検討する。図2に示す二つの側壁(Area 1 と Area 2)のうち Area 2 の主応力分布を図4(a)に示す。また、Area 2 の中央ライン(図中点線 path H)のロードファクターPDFを図4(b)に示す。側壁の応力は提案手法とねじり応力場がよく一致していることがわかる。Area 1 もほぼ同様な傾向であった。

以上の結果より、はりのノッチング部で破壊する場合も、側壁で破壊する場合も破壊力学的観点からは本論文が提案する曲げねじり混合試験は、ねじり試験を代替できるものと考えられる。両破壊起点が競合する場合も、側壁部とノッチング部のそれぞれの最大応力値の比 ($\sigma_{\text{notching}}/\sigma_{\text{sidewall}}$) は、曲げねじり試験で 0.54、ねじり試験で 0.47 となり、代用可能と考えられる。

2・2 荷重負荷機構に関する問題点と改善手法の提案

前報の曲げねじり混合試験では、図1に示す試験片に空けた穴に針状の治具を押込むという方式で荷重を負荷した。治具押込み用の穴の直径は 0.5mm、治具先端の直径は 0.3mm 程度である。この荷重負荷方式の試験法の利点は、穴に完全に治具を押込むことによって位置合わせが正確かつ簡便に行えるという点にあった。しかし、エッチングダメージの改善により強度の上昇した試験片について同様の試験を行い、試験結果と FEM による解析結果を比較すると、図5に示すような荷重変位曲線が得られ、大きな差が生じることがわかる。この原因について、以下のような理由が考えられる。図6(a)に示すように、曲げねじり混合試験においては、試験片が鉛直方向に変位するにしたがって、穴の位置は水平方向に変位する。そのため、変位が大きくなるにしたがって治具と穴の位置関係より試験片には水平方向への荷重が生じると考えられる。実際に試験を行っているときの写真を図6(b)に示す。治具と試験片の接触によりチッピング(欠け)が生じていることがわかり、水平方向の荷重が生じていると推測できる。

そこで、本論文においては試験治具先端の曲率半径を大きくし、治具先端が試験片の穴に入り込まないようにした。具体的に治具先端の直径を 0.3mm から 0.7mm に変更した。これにより、図7(a)に示すように、荷重負荷とともに治具先端と試験片の間で、接触領域が変化していくと考えられる。試験片に荷重が加わると、まず図7(a)に示されるように、試験片のミラ

一部分と治具との間で接触が起こる．さらに変位すると， に示されるように穴のエッジ部分と治具先端での接触領域が変化していき試験片に荷重が加えられる．本試験方法では接触領域が変化していくことにより図 6(a)で示されたような鉛直方向以外の荷重の影響が極めて小さくなると考えられる．このようにして行った試験結果と FEM による解析結果の比較を図 8 に示す．両者は非常に良く一致することがわかる．これより，有限要素法で想定されるねじり荷重の負荷が実現されていると考えられる．

一方，提案手法の問題点として，治具を穴に押込

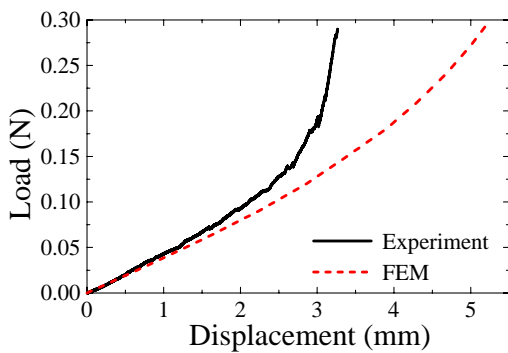


Fig. 5 Displacement-load curves of FEM and experimental results (previous method)

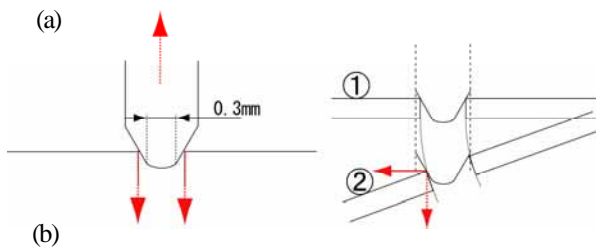


Fig. 6 (a) Schematic view of contact state between needle and specimen. (b): Photograph of hole-needle contact region. (Previous method)

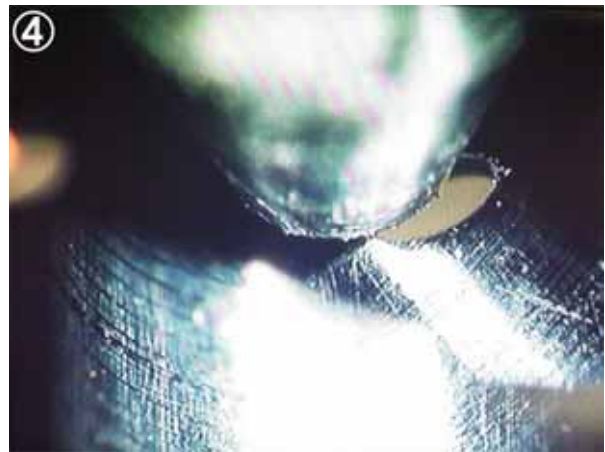
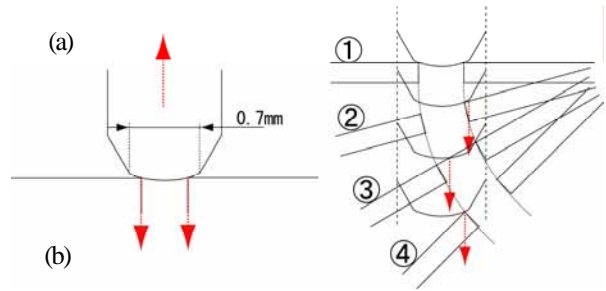


Fig. 7 (a) Schematic view of contact state between needle and specimen. (b) Photographs of hole-needle contact region. (Proposed method)

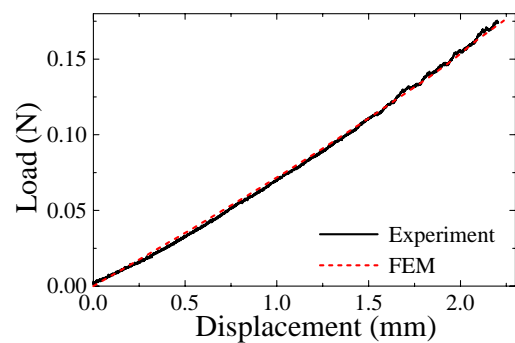


Fig. 8 Displacement-Load curves of FEM and experimental results (Proposed method)

んで位置合わせを行うことができないため、初期位置合わせが困難であり、試験手順による誤差を生じる可能性が高い点と、治具と試験片の接触面が変位とともに変化している過程があるため、FEM による解析の際に荷重点を一意に定めることができず、解析変位と試験変位の間に誤差を生じる可能性が挙げられる。試験片の穴の直径は 0.5mm であるため、上述のような誤差は解析による荷重点と試験における荷重点の間で最大 0.5mm 程度の位置のずれによって生じると考えられる。FEM 解析により、そのような場合の影響を検討したところ、0.5mm 程度のずれにおいて、変位のずれは 10%程度であり、最大第一主応力のずれは 5%程度であることがわかった。

以上の検討により、本研究で提案する新たな曲げねじり試験は、簡易的なねじり試験手法と見なせると考えられる。

3. 結果と考察

3・1 簡易ねじり試験結果と考察 提案手法により、簡易ねじり試験を行い、実際に強度評価を行った。用いた試験片は別途提案されている双方向曲げ試験⁽⁹⁾におけるM2 試験片と同じもので、表 1 の下段に示す寸法となっている。提案手法では、表 1 中段に示すように、 $2b=0.1mm$ であったが、MEMS製作の都合上、本論文では試験片を技術的に作ることが出来なかった。この製作上の問題は、エッチング技術の進歩（ノッチングを軽減させるノッチングフリープロセスの導入）により、現在では解決されている。ここでは、 $2b=0.15mm$ の試験片を使って手法の検証を行うために、 $2b=0.15mm$ の試験片の応力場について検討する必要がある。

$2b=0.15mm$ の試験片のノッチング部（path B）と側壁部（path H）のロードファクターPDFを図 9, 10 にそれぞれ示す。path Aは $2b=0.1mm$ 同様ほぼ一致した分布が得られるが、path Bの応力は、前報⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾より大きく改善はされているが、ピークが二箇所になり、ねじり応力場と若干の違いが生じる。よって、フィレット部で壊れるサンプルが若干多くなると考えられる。側壁部はほぼ一致することがわかる。また、側壁部とノッチング部のそれぞれの最大応力値の比（ $\sigma_{notching}/\sigma_{sidewall}$ ）は、簡易ねじり試験で 0.51、ねじり試験で 0.46 となったため、よく再現されていると考えられる。

両方向からのねじりを模擬するために、試験片の表裏双方向から簡易ねじり試験（表：29 サンプル，裏：27 サンプル）を行い、2 母数ワイブルプロットによって結果を整理した。結果を図 11 に示す。なお、

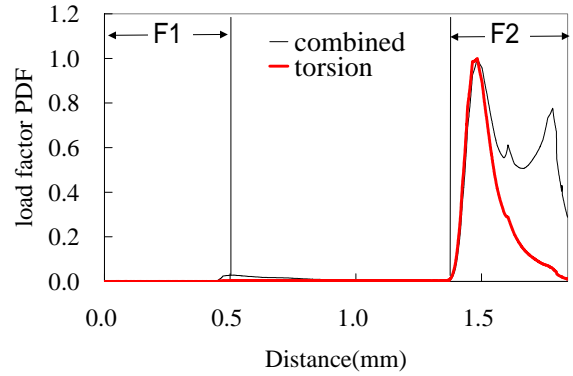


Fig. 9 Load factor PDFs along path B (notching region) in the case of combined and torsional loadings ($2b=0.15mm$ specimen)

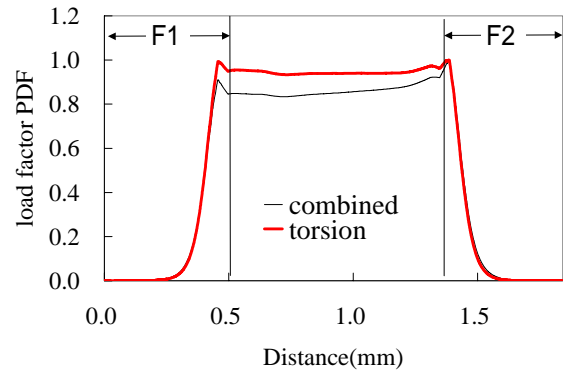


Fig. 10 Load factor PDFs along path H (center of the beam).

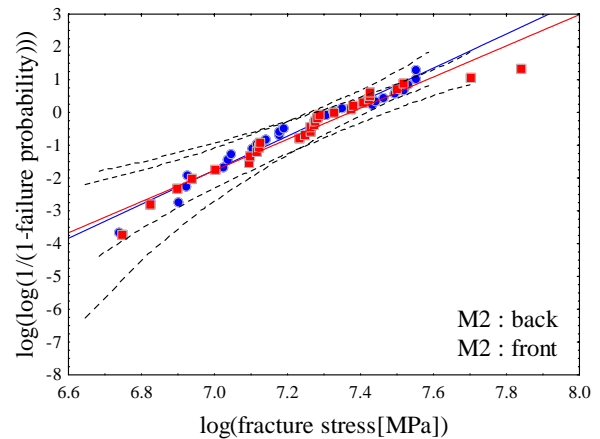


Fig. 11 Weibull plots of fracture stress

Table 2 Scale and shape parameters of simple torsional test

	#sample	Shape parameter	Scale parameter [MPa]
back	27	5.26	1541
front	29	4.08	1598
front and back	56	4.4	1575

ここでの破壊応力は、はり側壁における最大の第一主応力としている。各ワイブル母数は最尤法より求めた母数の結果を表 2 に示す。Modified Kolmogorov-Smirnov Test により、表裏の強度分布はワイブル分布に適合することを検証した。また、表裏方向の試験結果の代表値に有意な差がないことを Kruskal-Wallis H Test により確認した。したがって、ここでは両方向の実験結果を足し合わせて求めたワイブル分布の母数を試験片のねじり試験における強度の特性値とする。 $(\alpha=4.4, \beta=1575\text{MPa})$

次に破壊起点に関する考察を行う。ねじり破壊においては、試験片が破壊時に粉碎してしまうものが多く、正確な起点推定は難しいが、おおむね図 12 に示すように、はりの中央部で壊れるものと、フィレット部付近で壊れるものが観察された。前者は側壁の高応力部で破壊していると考えられる。後者は、ノッチング部か、フィレット付近の側壁部で壊れていると考えられるが、フィレット部付近で壊れているものが、側壁で壊れるものより 2 倍程度多いことより、多くはノッチング部で壊れていると考えられる。

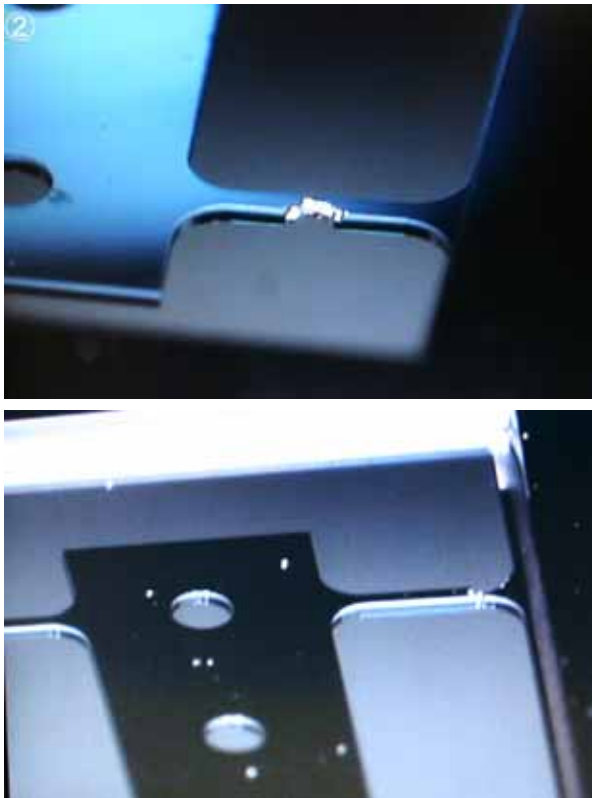


Fig. 12 Photographs of two typical fracture points (Upper: center of beam, Lower: fillet region of beam)

3・2 側壁とノッチング部の強度に関する考察
 図 13 に側壁のSEM写真を示す。別報⁽¹⁹⁾で詳しい観察を行っているが、ノッチング部と呼ばれるエッチング

終端部のあれが大きいことがわかる。粗さ測定によりノッチング部(1 μm 程度の領域)の高さデータの算術平均粗さは $R_a=0.25\mu\text{m}$ 、側壁中央部は $R_a=0.025\mu\text{m}$ 程度であることがわかった。よって、ノッチング部の強度は側壁より低いと考えられるが、応力は側壁部がおおよそ 2 倍程度大きいため、側壁での破壊とノッチング部での破壊の競合が生じると考えられる。

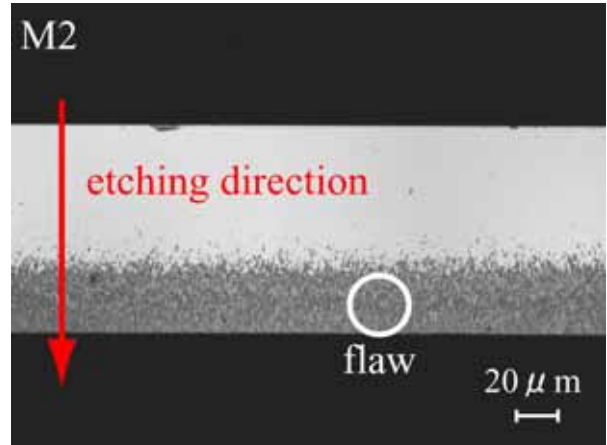


Fig. 13 SEM photograph of side wall of the beam

一方、同じサンプルを使ったノッチング部のみに高応力を負荷する曲げ試験(図 1(a)の A 点を押す)では、形状母数 3.64、尺度母数 1148MPa という強度値を得ている。今、仮に側壁全体がノッチング部と同じ強度(粗さ)だとして、曲げ試験と簡易ねじり試験の荷重形態による見かけの強度差を寸法効果の式と側壁の応力分布から見積もると、尺度母数は 60% (形状母数: 4.40) から 54% (形状母数: 3.64) 程度低くなるという結果が得られた。しかしながら、本論文で得られた簡易ねじり試験の尺度母数は 1575MPa と、曲げ試験の値より大きくなっている。これは側壁のあれが小さいため、ノッチング部より強度が高いことに起因すると考えられる。

以上の議論は欠陥(強度)分布が一様であるという仮定に基づいている。実際には、不均一な強度分布と応力分布を有する脆性材料の構造材料としての強度を議論する必要がある。このような点はChenら⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾によっても指摘されているが、現時点では強度分布の見積もりが難しいため、定量化は今後の課題としたい。

4. 結 言

MEMS マイクロミラーの簡易ねじり強度試験手法を開発した。前報で提案された曲げねじり混合試験について、試験片の形状と負荷機構を改善することによって、ねじり試験とほぼ等価な試験を行うことが可能

になった．試験結果を実サンプルに適用し，形状母数 $\alpha=4.4$ ，尺度母数 $\beta=1575\text{MPa}$ という結果を得た．起点観察の結果より，ねじり破壊は，応力が高い側壁部とダメージが大きいノッチング部において競合的に起こっていると考えられる．また，不均一な欠陥分布と応力分布に支配される MEMS マイクロミラーのねじり強度評価は，本研究で提案する簡易ねじり試験を用いて可能になったと考えられる．

謝 辞

本研究において，日本信号(株)ビジョナリービジネスセンター上田譲氏ならびに鈴木敦氏には，試験片の提供及び有意義な議論を頂いた．ここに謝意を表する．

文 献

- (1) N. Asada, H. Matsuki, K. Minami, and M. Esashi, *IEEE Trans. Magnetics*, 30, (1994), 4647.
- (2) T. Yi and C. Kim, *Meas. Sci. Technology*, 10, (1999), 706.
- (3) O. Jadaan, N. Nemeth, J. Bagdahn, and W. Sharpe, *J. Mater. Sci.*, 38, (2003), 4087.
- (4) J. Vedde, P. Gravesen, *Mater. Sci. Eng.*, B36, (1996), 246.
- (5) J. Ding, Y. Meng, and S. Wen, *Mater. Sci. Eng.*, B83, (2001), 42.
- (6) T. Namazu, Y. Isono, and T. Tanaka, *J. Microelectromech. Syst.*, 9, (2000), 450.
- (7) C. Wilson, A. Ormeggi, and M. Narbutovskih, *J. Appl. Phys.*, 79, (1996), 2386.
- (8) C. Wilson and A. Patricia, *J. Microelectromech. Syst.*, 5, (1996), 142.
- (9) M. Haque and M. Saif, *J. Microelectromech. Syst.*, 10, (2001), 146.
- (10) W. Sharpe, Jr., K. Jackson, K. Hemker, and Z. Xie, *J. Microelectromech. Syst.*, 10, (2001), 317.
- (11) L. Eisner, *Acta Metall.*, (1955), 414.
- (12) T. Tsuchiya, O. Tabato, J. Sakata, and Y. Taga, *J. Microelectromech. Syst.*, 7, (1998), 106.
- (13) K. Sato, T. Yoshioka, T. Ando, M. Shikida, and T. Kawabata, *Sensors and Actuators A*, 70, (1998), 148.
- (14) J. Bagdahn and W. Sharpe, O. Jadaan, *J. Microelectromech. Syst.*, 12, (2003), 302.
- (15) H. Espinosa, B. Prorok, and M. Fischer, *J. Mechanics and Solids*, 51, (2003), 47.
- (16) M. Saif and N. MacDonald, *Proc. IEEE 9th Ann. Int. Workshop on Microelectromech. Syst.* San Diego, CA, (1996), 105.
- (17) S. Izumi, C. W. Ping, M. Yamaguchi, S. Sakai, A. Suzuki, and Y. Ueda, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 71, No.703 (2005), pp. 387.
- (18) S. Izumi, C. W. Ping, M. Yamaguchi, S. Sakai, A. Suzuki, and Y. Ueda, *Engineering Fracture Mechanics*, 72, (2005), 2672-2685.
- (19) S. Izumi, M. Yamaguchi, K. Sasao, S. Sakai, A. Suzuki, and Y. Ueda, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, in press.
- (20) K-S. Chen, A. Ayon, and M. Spearing, *J. Am. Ceram. Soc.*, 83, (2000), 1476.
- (21) K-S. Chen and K-S. Ou, *Sensor and Actuators A*, 112, (2004), 164.
- (22) K-S. Chen, M. Spearing and N. Nemeth, *AIAA Journal*, 39, (2001), 720.