「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol. 55, No. 3, pp. 290-294, Mar. 2006
論　　文

# MEMSマイクロミラーの静的強度と疲労強度に対する信頼性設計手法の提案†

泉　　聡志*　門脇政幸**　酒井信介*
上田　　譲***　鈴木　　敦***

# Proposal of a Reliability-Based Design Method for Static and Fatigue Strength of MEMS Micromirror

by

Satoshi Izumi*, Masayuki Kadowaki**, Shinsuke Sakai*, Yuzuru Ueda*** and Atsushi Suzuki***

MEMS micromirror is used as optical switching or scanning devices, etc. Since the device is made from single crystalline silicon, the fracture stress involves large scattering. Therefore, reliability-based design procedure is indispensable. We propose a method to detect the design stress of both static and fatigue strengths.

As for static strength, a method to determine design stress by using Bayesian inference is proposed, where the design stress is determined by combining a few number of strength data of actual product and prior distribution based on sufficient experimental data. The proposed method is verified by simulated data through the comparison with conventional maximum likelihood method. It is found that the proposed method is especially effective when there is not sufficient strength data. As for the design stress for fatigue strength, a method to evaluate fatigue life in general working environment by extrapolating the experimental data of accelerated fatigue life tests is proposed. As a result, the fatigue design chart based on 99% prediction interval is shown.

***Key words*** : MEMS, Reliability, Design stress, Brittle fracture, Fatigue strength, Bayesian inference, Maximum likelihood method

## 1　緒　　言

MEMS (Mircoelectromechanical system) マイクロミラーは光スイッチやスキャニングなどに用いられる機能素子である．デバイスを支えるはりは動作時に大きなねじり変形を伴うため，構造信頼性を確保するためには十分な強度の確保が必要である.[1), 2)]デバイスは通常，脆性材料である単結晶シリコンを用いて製造されているため，破壊強度が大きくばらつくことが知られており，製造工程の違いによって強度が大きく異なることが現在までの研究で明らかになっている.[3), 4)]また，近年ギガサイクルオーダーでの疲労破壊の可能性が報告されており,[5)~8)]静的破壊だけではなく，疲労破壊に対する強度設計も不可欠であると考えられる．

MEMSの強度評価試験は数多く行われているが,[9)~11)]信頼性を考慮した研究は現在のところほとんど行われていない．脆性材料を構造材料として用いるため，強度の平均値だけでなく，そのバラツキに特に注意が必要であり，強度のバラツキを陽に扱った信頼性設計の必要性は将来的なMEMSの普及とともに増してくると考えられる．

単結晶シリコン製のMEMSの静的強度は極めて特殊性がある．すなわち，強度を決定するエッチングダメージ（表面微小き裂）はエッチング条件に強く依存する．加えて，ウェーハの温度，炉内の不純物，ガスの流束，マスクパターンによって大きく変化ため．同条件のエッチングであっても再現性が低く（ダメージがカタストロフィックに生じる不安定現象であることに起因すると考えられているが詳細は不明），対象とするデバイスの強度を知るためには実機と同条件・同形状の強度データが多く必要である．しかしながら，製品コストと開発期間の制限のため，異なる条件ごとに十分な強度データを集めることは現実的ではなく，効率的に強度を見積もる必要がある．

本研究では，類似の実機の十分な数の強度データ，もしくは実機と類似の形状・寸法および製造工程で作成した強度試験片から得られた十分な数の強度データを事前情報とし，対象となる実機の強度データを使って，ベイズ推定により実機の設計応力を決定する手法の提案を行う．ベイズ推定は経験や直感による主観的予測を解析の中に定量的に取り入れる方法で，データが少量しか用意できない場合に特に有効であることが知られている．提案手法を，従来手法である最尤法 (MLM : Maximum Likelihood Method) と比較し，有効性を検証する．

一方，疲労強度の評価に関しては，現在のところ5～10GPaオーダーの高応力，温度30℃，湿度50%の環境で

†　原稿受理　平成17年6月16日　Received June 16, 2005
*　正会員　東京大学工学系研究科機械工学専攻　〒113-8656　東京都文京区本郷，Dept. of Mech. Eng., Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656
**　学生会員　東京大学工学系研究科機械工学専攻　〒113-8656　東京都文京区本郷，Dept. of Mech. Eng., Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656
***　日本信号㈱ビジョナリービジネスセンター　〒170-6019　東京都豊島区東池袋，Visionary Business Center, Nippon Signal, Toshima-ku, Tokyo, 170-6019

10$\mu$m オーダーの形状での実験が行なわれており，[5)~7)] SN 曲線の評価により，$10^9$ ～ $10^{12}$ サイクルで疲労破壊に至ることが示されている．一方，MEMS マイクロミラーのはりは 100$\mu$m オーダーの寸法であるため，通常環境での疲労破壊試験は長時間を要し，現実的でない．そこで，高温・高湿環境の疲労寿命加速環境下で行われたマイクロミラーの寿命データを通常使用環境に外挿し，さらに信頼性工学に基づいた区間推定を行うことにより，疲労寿命に対する設計応力を決定する手法を提案する．なお，疲労寿命がエッチングダメージに強く依存する場合は，静的強度のようにエッチング条件に合わせた評価法が必要であるが，現在のところエッチングダメージと疲労寿命の相関に関する報告がないため，疲労寿命に関してはベイズ推定を用いない．

## 2　MEMS マイクロミラーの破壊

本論文で解析対象とする MEMS マイクロミラー[2)]は Fig. 1 のように，おおよそ 4mm 角のミラーを細いはり（100$\mu$m × 100$\mu$m 断面，長さ 2.5mm）で支えた構造である．Fig. 2 に示すように，永久磁石による磁界中で，ミラー部に配置したコイルに電流を流すとローレンツ力が発生し，ミラー部を駆動させる．このとき，はりの部分は大きなねじり変形を受け，振れ角が大きいと，シリコン製のはりが脆性破壊する．よって，脆性材料の強度は大きくばらつくため，強度信頼性設計が必要となる．

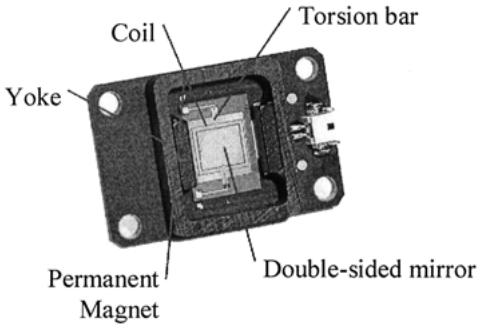


Fig. 1. MEMS micromirror “ECO SCAN (Nippon Signal Co LTD)”.

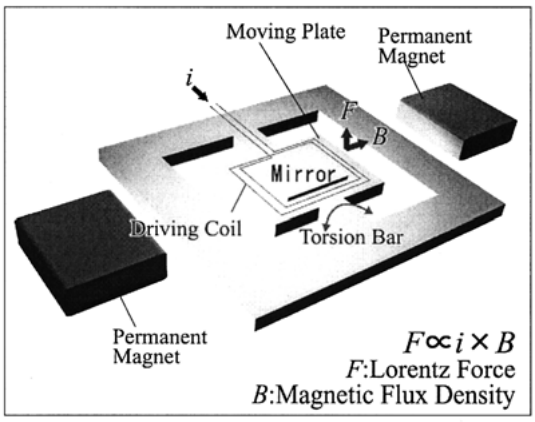


Fig. 2. Working principle of MEMS micromirror.

## 3　提　案　手　法

### 3・1　静的破壊強度に対する設計応力決定手法の提案

一般に脆性材料の強度分布は式 (1)に示すようなワイブル確率密度関数になると考えられており，前報[3), 4)]および数多くの実験[9)~11)]において，単結晶シリコンで作られる MEMS の強度もワイブル分布で整理できることが確かめられている．

$$g(x|\alpha,\beta)=\frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1}\exp\left\{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right\} \tag{1}$$

ここで，$\alpha$ は形状母数，$\beta$ は尺度母数である．実機の脆性破壊強度がワイブル分布に従うものとして，少数の実機強度データから設計応力を決定する手法を提案する．推定する母数の事前分布を $f_{prior}(\alpha,\ \beta)$ とし，実機を動作させて得られた強度データとして，$x_1$，$x_2$，$x_3$，…$x_n$ が得られたとすると，事後分布 $f_{posterior}(\alpha,\ \beta)$ は以下のようになる．[12), 13)]

$$f_{posterior}(\alpha,\beta)=\frac{\left\{\prod_{i=1}^{n}g(x_i|\alpha,\beta)\right\}f_{prior}(\alpha,\beta)}{\int_0^\infty\int_0^\infty\left\{\prod_{i=1}^{n}g(x_i|\alpha,\beta)\right\}f_{prior}(\alpha,\beta)\,d\alpha d\beta} \tag{2}$$

もし，形状母数 $\alpha$ の事後分布にのみ興味がある場合は，以下のように尺度母数 $\beta$ に対して積分を行う．尺度母数の場合も同様である．

$$f_{posterior}(\alpha)=\int_0^\infty f_{posterior}(\alpha,\beta)\,d\beta \tag{3}$$

事前分布 $f_{prior}(\alpha,\ \beta)$ は，過去の類似機器の実機強度データおよび，強度試験の強度データを用いて作成するが，ここでは前報[3)]のねじり強度試験より得られた値 ($\alpha_{exp}=5.28$，$\beta_{exp}=0.517$GPa) を一例として用いる．つまり，形状母数に関しては $\alpha_{exp}$ を，尺度母数については $\beta_{exp}$ を用いて，対数正規分布の事前分布を式 (4)のように設定した．ここで，対数平均の $\mu_{\alpha,prior}$ は $\alpha_{exp}$ に設定し，対数標準偏差の $\xi_{\alpha,prior}$ は試行錯誤により，変動係数が 40% になるように設定した．尺度母数の $\mu_{\beta,prior}$，$\zeta_{\beta,prior}$ に関しても同様に設定した．対数正規分布は負のパラメータの値を取らず，ベイズ推定に適しているという報告があるため，採用した．

$$\begin{aligned}f_{prior}(\alpha,\beta)=&\frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha\zeta_{\alpha,prior}}\exp\left(-\frac{(\ln\alpha-\mu_{\alpha,prior})^2}{2\zeta_{\alpha,prior}{}^2}\right)\\&\times\frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta\zeta_{\beta,prior}}\exp\left(-\frac{(\ln\beta-\mu_{\beta,prior})^2}{2\zeta_{\beta,prior}{}^2}\right)\end{aligned} \tag{4}$$

得られたワイブル母数の事後分布を使って，信頼水準を設定し，設計応力を決定する．信頼水準には，事前分布を使ったベイジアン確信区間 (credible interval) を用いる．適当な信頼水準と破壊許容確率を設定して，信頼水準に基づいた設計応力を求める．[13), 14)]ここで，95% 確信区間と 1% 破壊許容確率を設定し，設計応力を見積もった．また，実機動作時の応力のバラツキは，デバイス立ち上げ時などの不安定さを考慮して変動係数 10% の正規分布とした．

手法の検証のために，モンテカルロシミュレーションにより，最尤法との比較を行う．実機強度データのサンプル数が3の場合と10の場合について検討した．ここで，実機の真の強度は不明であり，事前分布に用いたデータと異なる可能性がある．よって，様々なパターンを想定した．すなわち，母数 $\alpha_{prior}$，$\beta_{prior}$ について，$\alpha_{exp}$，$\beta_{exp}$ の1/2，1倍，2倍になるケースを合計9ケース設定した．また，母数推定の結果の比較のために式(5)に示す相対誤差 $d_{posterior}$ を定義した．

$$d_{posterior} = \sqrt{\left(\frac{\alpha_{posterior} - \alpha_{true}}{\alpha_{true}}\right)^2 + \left(\frac{\beta_{posterior} - \beta_{true}}{\beta_{true}}\right)^2} \quad (5)$$

式(5)中の $\alpha_{posterior}$ および $\beta_{posterior}$ は事後分布の最頻値である．最尤法の場合には最尤推定値を用いる．また，$\alpha_{true}$ および $\beta_{true}$ は設定した実機の真の形状母数と尺度母数である．

なお，乱数によるばらつきを軽減するため，結果はすべて10回のシミュレーションの平均とした．

### 3・2　疲労寿命設計手法の提案

MEMSマイクロミラーの通常環境における寿命を推定するために，高温高湿下の疲労寿命実験データを使って，疲労寿命の評価式を作成する．ただし，可能な限り寿命に物理的な意味が含まれ，かつ実験の再現性が良いように評価式を試行錯誤的に設定した．疲労寿命 $L_f$ の評価式として式(6)のようなモデル式を立てた．$A$，$B$，$C$，$D$ は実験にあわせ込むパラメータ，$P$[%]は湿度，$T$[K]は温度，$\phi$[°]はミラーの振れ角（応力振幅）である．

$$L_f = AP^{-B}\exp\left(\frac{C}{T} - D\phi\right) \quad (6)$$

湿度 $P$ に関しては，多種の電子デバイスで用いられている経験式[15]を参考に，疲労寿命が湿度の累乗に比例すると仮定した．

$$L_f \propto p^{-B} \quad (7)$$

温度 $T$ に関しては，一般的な熱活性化過程によって整理できると仮定して，式(8)のようなアレニウスモデルの式を用いた．

$$L_f \propto \exp\left(\frac{C}{T}\right) \quad (8)$$

応力に関しては，疲労寿命の対数値が，応力振幅（ここで平均応力はゼロである）に比例して減少すると仮定した式(9)を用いた．ただし，ミラーの振れ角 $\phi$[°]（光学角)と応力振幅が比例関係にあると考え，式(9)は振れ角の式とした．

$$L_f \propto \exp(-D\phi) \quad (9)$$

式(7)から(9)の積を取った式(6)を疲労寿命の評価式として提案する．ただし，ミラーの共振運動の動的な効果は寿命には影響しない，つまり周波数に依存しないと仮定している．シリコンの疲労寿命のメカニズムは酸化膜形成によるき裂進展であるという提案[5)~7)]はあるが，詳細はわかっていない[8)]本研究の評価式は実験データにフィッティングするための経験式の域を出ない．

寿命評価に関しては，ばらつきの評価も行う必要がある．本論文では寿命 $L_f$ が対数正規分布に従うものと仮定した．これは様々な分布形状を試した結果，対数正規分布が一番寿命データに適合したためである．ここで，本来なら $A$，$B$，$C$，$D$ の四つのパラメータに対してバラツキを考慮した評価を行うべきであるが，パラメータの数が多いため，実験結果から意味のある評価が出来なかった．よって，最終的な寿命のみにバラツキを考慮した．具体的には，式(10)に示す寿命 $x$ の対数正規分布の確率密度関数 $f(x)$ 中の $x_0$ に式(6)の $L_f$ をあてはめて $A$，$B$，$C$，$D$ および $\zeta$ を最尤法により決定した．ここで，$\zeta$ は対数標準偏差である．

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\zeta}\exp\left(-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2\zeta^2}\right) \quad (10)$$

なお設計には十分な裕度を持たせる必要があるため，設計応力決定には99%予測区間を用いる．99%予測区間は累積確率密度関数の0.5%点から99.5%点の区間で定義される．99%予測区間の下限値，すなわち0.5%点を設計疲労寿命とした．

疲労設計応力の決定のため，式(10)の $x_0$ に対して，通常使用環境の温度と湿度を与え，振れ角をパラメータとして疲労寿命をプロットする．設計寿命を設定すると，設計振れ角（応力）が決定できる．応力と振れ角の関係は有限要素法によって決定でき，おおよそ $\sigma$[MPa] = $35\phi/2$[degree]の関係がある．

## 4　結 果 と 考 察

### 4・1　静的強度

サンプル数3の場合について，母数推定の相対誤差をTable Ⅰに示す．9ケースすべてについて，提案手法が最尤法よりも優れていることが分かる．サンプル数10の場合についての相対誤差をTable Ⅱに示す．実機の形状母数が $\alpha_{exp}$ に一致した場合(Case 4 ~ 6)は，最尤法よりも優れた推定が出来ている．しかし，その他の6ケースに関しては最尤法の方が優れている．これは，形状母数の

Table Ⅰ．Comparison of Bayesian inference and maximum likelihood method. Results shown were the average of 10 sets of data; each set of data contained 3 samples. Unit of scale parameter is GPa.

| | Parameters of ractual device | | Result of $d_{posterior}$ | |
|---|---|---|---|---|
| | Shape para. | Scale para. | Proposed method | MLM |
| Case 1 | 2.64 | 0.259 | 0.538 | 0.730 |
| Case 2 | 2.64 | 0.517 | 0.519 | 0.730 |
| Case 3 | 2.64 | 1.034 | 0.537 | 0.730 |
| Case 4 | 5.28 | 0.259 | 0.044 | 0.728 |
| Case 5 | 5.28 | 0.517 | 0.079 | 0.728 |
| Case 6 | 5.28 | 1.034 | 0.167 | 0.728 |
| Case 7 | 10.56 | 0.259 | 0.446 | 0.727 |
| Case 8 | 10.56 | 0.517 | 0.448 | 0.727 |
| Case 9 | 10.56 | 1.034 | 0.486 | 0.727 |

Table Ⅱ. Comparison of Bayesian inference and maximum likelihood method. Results shown were the average of 10 sets of data; each set of data contained 10 samples.

| | Parameters of actual device | | Result of $d_{posterior}$ | |
|---|---|---|---|---|
| | Shape para. | Scale para. | Proposed method | MLM |
| Case 1 | 2.64 | 0.259 | 0.233 | 0.093 |
| Case 2 | 2.64 | 0.517 | 0.199 | 0.093 |
| Case 3 | 2.64 | 1.034 | 0.162 | 0.093 |
| Case 4 | 5.28 | 0.259 | 0.009 | 0.093 |
| Case 5 | 5.28 | 0.517 | 0.079 | 0.093 |
| Case 6 | 5.28 | 1.034 | 0.057 | 0.093 |
| Case 7 | 10.56 | 0.259 | 0.236 | 0.093 |
| Case 8 | 10.56 | 0.517 | 0.243 | 0.093 |
| Case 9 | 10.56 | 1.034 | 0.253 | 0.093 |

推定が尺度母数の推定に比べ困難であるためと考えられる．つまり，形状母数に関して，事前分布を 0.5 倍（もしくは 2 倍）に見積もった場合，尺度母数に比べ修正が遅れるために，このような結果が得られたものと考えられる．よって，サンプル数が十分な場合は，最尤法を用いる方が良いと考えられる．

次に，95% 確信区間下限値（最尤法は 95% 信頼区間下限値）を用いて決定した設計応力を示す．破壊確率は 1% と設定した．サンプル数 3 の場合の結果を Table Ⅲに示す．提案手法と最尤法に加えて，実機の真の母数（$\alpha_{true}$, $\beta_{true}$）を用いた場合の設計応力も示す．提案手法および最尤法を用いて決定した設計応力は，サンプル数の増加とともに，真の母数を用いて求めた設計応力に漸近する．ここで，設計応力は真の母数による設計応力を超えずに，かつ，より近くなることが望ましい．Table Ⅲから分かるように，提案手法は，非常に少ないサンプル数でも合理的な設計応力を設定することができる．また，真の母数を使った設計応力を超えることなく，かつ，最尤法よりも優れた設定が可能となっている．

サンプル数 10 の場合の同様の結果を Table Ⅳに示す．実機の形状母数が $\alpha_{exp}$ の 1/2 の場合（Case1 ～ 3）は，

Table Ⅲ. Design stress determined by lower credible intervals when sample size is 3. Failure probability is 1%. Unit of design stress is MPa.

| | Proposed method | MLM | Design stress by true parameters |
|---|---|---|---|
| Case 1 | 20 | 0 | 44.8 |
| Case 2 | 35 | 0 | 89.5 |
| Case 3 | 46 | 0 | 179 |
| Case 4 | 27 | 1 | 105.8 |
| Case 5 | 52 | 1 | 211.6 |
| Case 6 | 79 | 2 | 423.3 |
| Case 7 | 33 | 12 | 160.4 |
| Case 8 | 65 | 24 | 320.7 |
| Case 9 | 102 | 47 | 641.4 |

Table Ⅳ. Design stress determined by lower credible intervals when sample size is 10. Failure probability is 1%.

| | Proposed method | MLM | Design stress by true parameters |
|---|---|---|---|
| Case 1 | 22 | 8 | 44.8 |
| Case 2 | 39 | 17 | 89.5 |
| Case 3 | 64 | 34 | 179 |
| Case 4 | 49 | 46 | 105.8 |
| Case 5 | 94 | 93 | 211.6 |
| Case 6 | 174 | 185 | 423.3 |
| Case 7 | 79 | 108 | 160.4 |
| Case 8 | 155 | 215 | 320.7 |
| Case 9 | 302 | 430 | 641.4 |

最尤法よりも優れた結果が得られる．また，実機の形状母数が $\alpha_{exp}$ と一致する場合（Case4 ～ 6）は，最尤法とほぼ同程度，$\alpha_{exp}$ の 2 倍の場合（Case7 ～ 9）は，最尤法の方が優れた結果を出した．相対誤差の結論と同様に，サンプル数が 10 個になると，提案手法の有効性は低くなる．

### 4・2 疲労寿命

**4・2・1 疲労実験データ** 疲労実験は恒温槽内に Fig. 1 に示す実際の MEMS マイクロミラー “EcoScan ESS115”[1), 2)]を入れて，500Hz で共振させることによって行った．振れ角と印加電圧の関係式から実際の振れ角を見積もった．抵抗変化により，自動的にマイクロミラーの破損を検出する装置を用いて寿命を測定した．振れ角は ±34°，40°，50°，55°，60°，70°，80° 温度は 20℃と 85℃，湿度は 25% と 80% の条件で実験を行った．

**4・2・2 疲労寿命設計応力の決定** 得られたデータより，最尤法を使って式 (6) (10)の $A$，$B$，$C$，$D$ および $\zeta$ の値を得た．それぞれ，10860 [cycle], 3.565，5243 [K]，0.329 [/°] および 2.42 となった．Fig. 3 に温度 85 [℃]，湿度 80 [%] の加速寿命環境において行った寿命試験データ（振れ角と寿命との関係）と，本手法で提案した 99% 予測区間（下限値が設計曲線）を示す．また，Table Ⅴに，その他の実験結果と計算結果を示す．評価

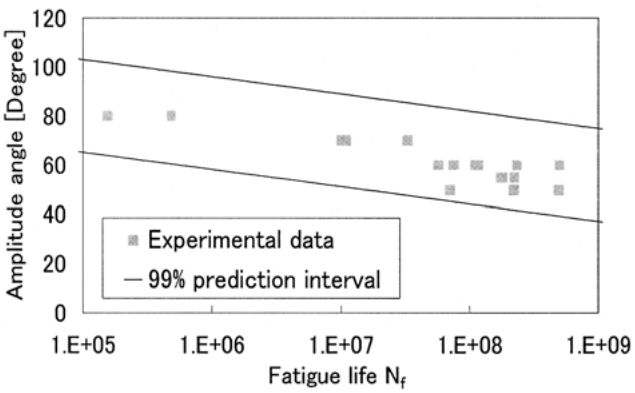


Fig. 3. Experimental data and 99% prediction interval of the fatigue life of MEMS micromirror (Temperature 85℃, Humidity 80%).

Table Ⅴ. Experimental data and 90% prediction interval of the fatigue life of MEMS micromirror.

| Temp. | Humidity | Experimental results | | | | Prediction interval | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ℃ | % | 1 | 2 | 3 | average | 0.5% | 50% | 100% |
| 20 | 80 | 1.7E+08 | 3.1E+08 | 4.1E+08 | 2.9E+08 | 5.4E+05 | 2.7E+08 | 1.4E+11 |
| 85 | 25 | 2.5E+08 | 6.4E+08 | 1.9E+09 | 9.3E+08 | 1.3E+06 | 6.7E+08 | 3.4E+11 |

式 (6) は実験結果をよく再現し，実験データは全て 99% 予測区間内に収まっていることがわかる．次に，日本の標準環境（1971-2000 年の東京の気象データ：平均最高気温 19.7℃，平均湿度 63%）における，振れ角と寿命との関係の 99% 予測区間の下限値（設計寿命の設計応力線図）を Fig. 4 に示す．10 年の寿命を目標とするならば 35° 程度，100 年の寿命を目標とするならば 25° 程度の振れ角を設定する必要があることがわかる．

## 5 結　　論

MEMS マイクロミラーの静的強度と疲労強度の設計応力決定手法を提案した．

MEMS マイクロミラーの静的強度の設計応力の決定法として，事前分布に十分な数の実験データを用い，少数の実機の強度データで設計応力をベイズ推定により決定する手法を提案した．仮想データにより，従来手法である最尤法と比較し，提案手法の有効性を実証した．本手法は特に，実機の強度データが少ない場合に有効である．

また，マイクロミラーの疲労破壊に対する設計応力の決定に関して，加速寿命試験結果を通常使用環境に外挿評価する手法を提案した．99% 予測区間により疲労設計線図を導出した．

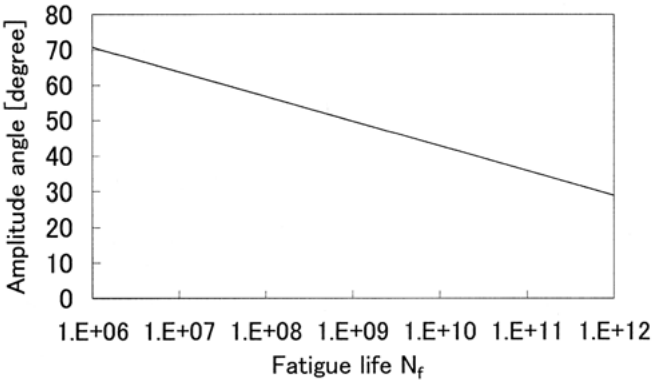


Fig. 4. Lower 99% prediction interval of the fatigue life of MEMS micromirror (Temperature 20℃, Humidity 64%).

## 参　考　文　献


1) N. Asada, H. Matsuki, K. Minami and M. Esashi, IEEE Transactions on Magnetics, **30**, 4647 (1994).
2) http://www.signal.co.jp/vbc/mems/ECO SCAN ESS115.
3) 泉　聡志，Chan Wee Ping，山口　真，酒井信介，鈴木　敦，上田　譲，日本機械学会論文集，A-**71**，387（2005）.
4) 泉　聡志，山口　真，酒井信介，鈴木　敦，上田　譲，日本機械学会論文集 A 編（投稿中）.
5) W. Arsdell and S. Brown, J. Microelectromech. Syst., **8**, 319 (1999).
6) R. Ritchie, Int. J. Fracture, **100**, 55 (1999).
7) C. Muhlstein, S. Brown and R. Ritchie, J. Microelectromech. Syst., **10**, 593 (2001).
8) H. Kahn, R. Ballarini and A. Heuer, Current Opinion in Solid State and Mater. Sci., **8**, 71 (2004).
9) T. Yi and C. Kim, Meas. Sci. Tech., **10**, 706 (1999).
10) T. Namazu, Y. Isono and T. Tanaka, J. Microelectromech. Syst., **9**, 450 (2000).
11) C. J. Wilson, A. Ormeggi and M. Narbutovskih, J. Appl. Phys., **79**, 2386 (1996).
12) 市川昌弘，“構造信頼性”，p.160（1988）海文堂.
13) J. M. Bernardo and A. F. M. Smith, “Bayesian theory”, p.241, (1994) John Wiley.
14) 酒井信介，岡島智史，泉　聡志，岩崎　篤，材料，**54**，308（2005）.
15) 高　久清，山本繁晴，柴田義文，佐伯輝憲，岩間英雄，“デバイス・部品の信頼性試験”，p.154（1992）日科技連.