修士論文

<u>MEMSマイクロミラーの</u> 疲労寿命試験法の開発

<u>p.1 ~58</u>

<u>平成 18 年 2 月 10 日 提出</u> <u>指導教員 泉 聡志 助教授</u> <u>46202 笹尾 邦彦</u>

目次		
第1章	序論	5
1.1	研究の背景	5
1.2	本研究の目的	7
1.3	本論文の構成	7
第2章	基本的理論	8
2.1	最尤法	8
2.2	酸化膜形成と膜厚測定	9
2.2.1	1 シリコン酸化膜の成長メカニズム	9
2.2.2	2 酸化膜測定~エリプソメーター	10
第3章	疲労寿命試験機の開発と試験方法	11
3.1	疲労寿命試験機の設計	11
3.1.1	1 試験機に必要な機能	11
3.1.2	2 チップホルダーの設計	11
3.1.3	3 磁石・ヨークの設計	12
3.1.4	4 試験機本体の設計	14
3.2	試験方法	15
3.2.1	1 試験条件	15
3.2.2	2 試験のセットアップ	16
第4章	結果	19
第5章	考察	21
5.1	酸化膜の影響	21
5.2	結果データの各パラメータによる整理	23
5.2.1	1 湿度による整理	23
5.2.2	2 温度による整理	24
5.2.3	3 振れ角による整理	25
5.3	寿命の外挿	26
5.4	過去の研究結果との比較	28
5.4.1	1 本試験と過去の試験の違い	28
5.4.2	2 比較検討	28
5.5	試験の問題点と今後の展望	31
第6章	結論	32
付録 A	FEM によるマイクロミラー応力状態解析	33
付録 B	過去の試験データ	35
付録C	疲労寿命試験機設計図	36
あとがき		55
参考論文		56

図表目次

Fig.1.1	Ecoscan from Nippon Signal Corporation	6
Fig.1.2	Working principle of the micro-mirror	6
Fig.1.3	Specimen which Muhlstein used	6
Fig.1.4	Schematic of the reaction layer fatigue mechanism at the n	root of the
	notch	7
Fig. 1.5	Specimen which Kahn used	7
Fig.2.1	Processes of thermal oxidation (Deal-Grove model)	10
Fig.2.2	Interference principle of light	11
Fig.2.3	Concept drawing of measurement	11
Fig.3.1	Tip holder with ECO SCAN ESS115	12
Fig.3.2	FEM model (left : air model ; right : yoke and magnet model)	13
Fig.3.3	Result of FEM analysis (Vector plot)	14
Fig.3.4	Magnetic flux density of place where chip is fixed	14
Fig.3.5	Fatigue life testing machine (left: draft of testing machine;	
	right: Actual testing machine)	15
Fig.3.6	Environment where fatigue life test is done	16
Fig.3.7	Configuration of MEMS micromirror	16
Fig.3.8	Angle measuring instrument	18
Fig.3.9	Temperature and Humidity testing Chamber	
	(Fatigue life testing machine is entered)	18
Fig.3.10	Drive circuit and Data collecting systems	19
Fig.3.11	Working range of Temperature and	
	Humidity testing Chamber	19
Fig.4.1	Result of Fatigue life testing (Temperature $80[^{\circ}C]$	
	Humidity 60[%] Amplitude angle 60[deg.])	20
Fig.5.1	Experiment Ψ data and Generated Ψ data	22
Fig.5.2	Experiment Δ data and Generated Δ data	22
Fig.5.3	Experimental data and 90% prediction interval	
	of the fatigue life of MEMS micromirror (Humidity 80 %)	30
Fig.5.4	Experimental data and 90% prediction interval	
	of the fatigue life of MEMS micromirror (Humidity 80 %)	30
	by Izumi	
Fig.5.5	Lower 90% and 50% prediction interval	
	of the fatigue life of MEMS micromirror (Humidity 63 %)	31

Fig.5.6	Lower 90% and 50% prediction interval				
	of the fatigue life of MEMS micromirror				
	(Humidity 63 % : Previous data was used)	31			
Fig.A.1	FEM model(ECO SCAN –ESS115)	33			
Fig.A.2	Result of FEM analysis (principal stress distribution)	34			
Fig.A.3	Relation of Amplitude angle and maximum stress				
Table.3.1	Material properties used in the FEM analysis	14			
Table.3.2	Relation of Temperature and Amplitude angle	17			
Table.4.1	Result of Fatigue life test according to environment	20			
Table.4.2	Result of Fatigue life test	21			
Table.5.1	Measurement result of oxide film	23			
Table.5.2	Result of Fatigue life test attention to humidity	24			
Table.5.3	Result of Fatigue life test attention to temperature	25			
Table.5.4	Result of Fatigue life test attention to temperature	26			
Table.A.1	Material properties used in the FEM analysis ;				
	The values are based on the elastic constants				
	of x:[110],y:[110],z:[001]	33			
Table.B.1	Result of Fatigue life test according to environment	35			
Table.B.2	Result of Fatigue life test	35			

第1章 序論

1.1 研究の背景

MEMS (Microelectromechanical system) マイクロミラーは,スキャニングデバ イス[1-4],プロジェクタ[5],オプティカルスイッチ[6,7]などに用いられている機能素 子である.商品化されている製品の一例として日本信号(株)の製品「Eco-Scan」を Fig.1.1 に示す.

マイクロミラーの動作原理を Fig1.2 に示す.はりと直行する方向に磁束密度 B の磁 界中において,駆動コイルに電流 i を流すことにより,ローレンツ力 F が発生する. このローレンツ力により回転トルクが発生し,トーションバーの復元力とつりあう位 置までミラーを傾けることができる.電流の方向によってミラーの傾く方向を制御し, 電流の大きさによってミラーの傾きを制御する.共振周波数の交流電流を利用するこ とで,直流電流の場合よりもさらに大きくミラーを傾けることが可能となる.

MEMS マイクロミラーは脆性材料である単結晶シリコンで作られている.単結晶シ リコンは脆性材料であるため、ミラーを大きくねじった場合に脆性的に破壊する.し たがって,MEMS マイクロミラーの実用化にあた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力学的特性を明らかにすることが必要となる.

静的な強度評価に関して,泉ら[8]はマイクロミラーを模擬した試験片と,その試験 片を用いた,曲げ,曲げねじり混合試験を提案し,外挿によって純ねじり下における 実機の強度評価を試みた.泉らは,ねじり破壊においてもノッチングと呼ばれる高ダ メージ領域の影響が支配的と考え,その中で,ノッチング部の応力場が曲げねじり混 合試験において最も厳しい状態であることから,これをマイクロミラーの破壊強度と して用いることが安全側への代替評価となるという評価手法を提案した.また,山口 [9]は製造プロセスによって異なるエッチングダメージが MEMS マイクロミラーの強 度に及ぼす影響についての評価を試みた.山口はノッチング部の簡易的で実用的な強 度評価手法である双方向曲げ試験を行い,ノッチング部の強度評価ができることを示 し,粗さと強度低下の関係を示唆した.

一方,内部欠陥がないため疲労破壊しないと考えられてきた単結晶シリコンだが, 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[10-15],デバイス の信頼性を確保するためには,静的破壊だけではなく疲労破壊に対する強度評価が不 可欠であると間がえられる.疲労強度の評価に関して,現在までに 5~10[GPa]オーダ ーの応力,温度 30[],湿度 50[%RH]の環境で 10[µm]オーダーの形状での実験が行 われており[10-15],SN曲線の評価によって,10⁹~10¹²サイクルで疲労破壊に至るこ とが示されている.たとえば,Muhlsteinら[10-12]はFig.1.3 のような試験片を製作し 耐久試験を行った.その研究の中でFig.1.4 のような,シリコンの破断メカニズムの提 案を行っている.また,Kahnら[13,14]はFig.1.5のような試験片を製作し耐久試験を行った.Kahnらはシリコンの破断のメカニズムはいまだ明らかにされていないと結論付けている.



Fig.1.1 Eco scan from Nippon Signal Corporation



Fig.1.2 Working principle of the micro-mirror



Fig.1.3 Specimen which Muhlstein used



Fig.1.4 Schematic of the reaction layer fatigue mechanism at the root of the notch, (a)Reaction layer (native oxide) on surface of the silicon, (b)localized oxide thickening at the notch root, (c)stress corrosion cracking of the notch root, (d)additional thickening and cracking of reaction layer and (e)critical crack growth in the silicon films.



Fig.1.5 Specimen which Kahn used

1.2 本研究の目的

本研究では,MEMSマイクロミラーの疲労寿命試験機を開発し,実機の疲労寿命を 求める.ただし,本研究の対象である MEMS マイクロミラーのはりは 100[µm]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する.そこで,本研 究では高温・高湿環境の疲労寿命加速環境下で耐久試験を行い,通常使用環境での疲 労寿命を外挿する手法を検討する.

1.3 本論文の構成

第1章では MEMS マイクロミラーの強度に関するこれまでの研究の動向と課題を 述べ,本研究の目的を示した.

第2章では,本研究で必要となる基礎的な理論について簡単に説明をする.

第3章では,疲労寿命試験機の開発について,試験機に必要となる機能とその設計 方法について説明する.また,試験片と耐久試験の方法についても説明をする.

第4章では,開発した疲労寿命試験機を用いた試験による結果を示す.

第5章では,寿命と酸化膜の形成の関係について考察し,第4章で示した結果を元 に通常環境下でも寿命の外挿を行う.加えて,過去の研究との比較検討を行う.

第6章において,本研究のまとめを行う.

第2章 基礎的理論

2.1 最尤法

任意に取り出した無作為標本がある確率密度関数に従うとしたとき,関数に内包 される不定のパラメータの推定量を標本から見つけ出す方法として以下に示す最尤 法(*Maximum Likelihood Method*)がある. $X_1, X_2, \cdot \cdot \cdot, X_n$ を密度関数 $f(x; \{\theta_j\}_{j=1}^m)$ をも つ分布からの独立標本とし,それらの同時密度関数を,

$$L(\{\theta_{j}\}_{j=1}^{m}; x_{1}, x_{2}, \cdot \cdot \cdot, x_{n}) \equiv \prod_{i=1}^{n} f(x_{i}; \{\theta_{j}\}_{j=1}^{m})$$
(1.1)

とおく.これは $\{x_i\}_{i=1}^n, \{\theta_j\}_{j=1}^m$ の関数であるが,データ $\{x_i\}_{i=1}^n$ を固定し, $\{\theta_j\}_{j=1}^m$ の関数と考えたとき尤度関数(*Likelihood Function*)という.

更に, $L(\{\theta_j\}_{j=1}^m)$ の値を最大にする $\{\theta_j\}_{j=1}^m = \left\{\stackrel{\bullet}{\theta}_j\right\}_{j=1}^m$ が存在するとき,

$$\theta_j(x_1, x_2, \cdot \cdot \cdot, x_n) \qquad j = 1, 2, \cdot \cdot \cdot, m$$

$$(1.2)$$

を $\theta_j(x_1, x_2, \cdot \cdot, x_n)$ の最尤推定量(Maximum Likelihood Estimator)という。 ここで,式(1.1)の両辺の対数をとると式(1.3)のようになる.

$$\ln L(\{\theta_j\}_{j=1}^m; x_1, x_2, \cdot \cdot, x_n) \equiv \sum_{i=1}^n \ln f(x_i; \{\theta_j\}_{j=1}^m)$$
(1.3)

式(1.3)より, $L(\{\theta_j\}_{j=1}^m)$ の値を最大にする $\{\theta_j\}_{j=1}^m$ を求める代わりに $\ln L(\{\theta_j\}_{j=1}^m)$ の

値を最大にする $\left\{ heta_{j}
ight\} _{_{j=1}}^{m}$ を求めるほうが計算が簡単になる場合が多い.すなわち,

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta_1} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \ln L}{\partial \theta_2} = 0 \quad , \quad \cdot \quad \cdot \quad , \quad \frac{\partial \ln L}{\partial \theta_m} = 0 \tag{1.4}$$

を満たす $\left\{ heta_{j}
ight\}_{j=1}^{m}$ をもって $\left\{ eta_{j}
ight\}_{j=1}^{m}$ とする.

最尤法でのパラメータ測定には,データ数が最低 30 程度ある場合精度よく母数を 推定することが可能となる.

2.2 酸化膜形成と膜厚測定

2.2.1 シリコン酸化膜の成長メカニズム

シリコンの酸化膜の成長モデルは Deal-Grove モデル[16]で説明することがで きる.このモデルでは Fig2.1 に示すように酸化種の輸送に関して 3 つの過程を考 える.すなわち,気相中から酸化膜表面への移動(F1),酸化膜中の拡散(F2),酸 化膜/シリコン界面での反応(F3)に関して,酸化種の分圧,酸化種の濃度勾配お よび酸化反応確立により,酸化時間に対する酸化膜厚の関係を導出する.

酸化膜が薄い場合,酸化膜厚は $do = (B/A)(t + \tau)$ と表され,時間に対して線形を 示す.酸化膜が厚い場合には $do^2 = Bt$ となり,時間の平方根に比例する.B/Aは 直線速度係数,Bは放物線速度係数と呼ばれ,前者は酸化膜/シリコン界面での 酸化反応が酸化膜の成長速度を律速していることを,後者は酸化膜中における参 加種の拡散現象が成長速度を律速していることを示している.



Fig.2.1 Processes of thermal oxidation (Deal-Grove model)

2.2.2 酸化膜測定~エリプソメーター

基板上に薄膜があるとき,この薄膜から反射してくる光は干渉の結果,入射光 とは位相振幅強度が異なっている(Fig.2.2).直線偏光を入射すると,反射光は楕円 偏光になることを利用し(Fig.2.3),エリプソメトリでは楕円偏光の位相角 と 楕円の振幅強度比から求められる正接 を測定し,薄膜の膜厚 d 及び複素屈折 率 N を求める.

エリプソメーターで測定された および の値から膜厚 d と屈折率 N を解析 的に求めることはでないが,逆に d と N からは と を計算で求めることがで きる.そこで、様々な d と N について と を計算した表やチャートをあらか じめ用意しておき、 d と N を決定する.これがエリプソメーターによる酸化膜厚 測定の流れである.

incident radiation



Fig.2.2 Interference principle of light



Fig.2.3 Concept drawing of measurement

第3章 疲労寿命試験機の開発と試験方法

3.1 疲労寿命試験機の設計

3.1.1 試験機に必要な機能

本試験機に必要と思われる機能について以下に箇条書きにする.

商品化されている MEMS マイクロミラーには数種類ある .本研究で試験対象と するミラーは日本信号(株)社製の ECO SCAN - ESS115 だが,試験の汎用性 のため他の種類のチップも駆動できる必要がある.

現在流通している恒温・恒湿槽の中で最も小型である 300mm×300mm×300mm に 試験機全体が収まる必要がある.

試験効率を上げるため ,1 環境で複数のチップを駆動できるようにする必要がある.

3.1.2 チップホルダーの設計

本試験で使用する ESS115 チップ以外のチップにも対応させるために,チップの 固定方法は直接試験機にセットするのではなく,一度チップホルダーに固定した後 に,そのホルダーを試験機にセットするという方式をとる.そのため,商品化され ているすべての MEMS マイクロミラーの外形を計測した.計測の結果,チップは 大別して2種類の大きさがあることが分かったため,2種類のチップホルダーとそ の周辺装置を設計する必要がある.本試験で使用するチップホルダーの外形図を Fig.3.1 に示す.また,チップは壊れやすいため,ホルダーから容易に取り出せる必 要がある.そのためにチップを固定している場所の横に溝を作り,そこにピンセッ トを差し入れることにより容易にチップを取り出すことができるようにした

3.1.1. の機能については,チップホルダーに最大5つのチップを固定することが可能であり,1度の試験で最大5サンプルの試験を行うことができる.



Fig3.1 Tip holder with ECO SCAN ESS115

3.1.3 磁石・ヨークの設計

MEMS マイクロミラーは序論にも書いたとおり,磁束密度 Bの磁界中において, 駆動コイルに電流 i を流すことにより生じたローレンツ力で駆動している.本試験 で使用するチップを駆動させるにはこの磁束密度 B が 0.3[T]程度必要とされる.

磁石については,試験中高温になるため温度耐性のあるものでなければならない. そのため,本試験機には高温でも強い磁力を発揮することができる NEOMAX-44H を使用する.

ヨークについては,有限要素法解析ソフト ANSYS9.0 を使用して大きさ,形状, 材質などを変えながら解析を行った.ここで,ヨークとは磁石が持つ吸着力を増幅 するための軟鉄版のことである.磁力線は磁性体に透入すると,磁性体の両端に集 中する.ヨークはその磁石の持っているN極とS極を近づけるように組み合わせ, 吸着力あるいは吸引力を増大させる役目を持っている.

解析のモデルについては,本試験で使用する形状の磁石,ヨーク,および磁束が 外に漏れ出さない十分に大きな領域の空気をモデリングした.Fig.3.2 にモデルとそ のメッシュ形状を示す.なお,モデルには ANSYS 磁場要素 Solid97 を使用し,要 素数 65804,節点数 47578 のメッシュをきって解析を行った.

境界条件としては次の2つを設定した.

2 つの磁石のちょうど中間の面において,モデルは y 軸方向に対称になっている ので.この面を貫通する磁束は面に対して垂直になっているものとしx - z 面に磁 束垂直条件を定義した.また,空気の領域は十分に大きくとったため,磁束がこの 領域から外に漏れ出すことはないと仮定する.そのため,空気モデルの外側の面す べてに磁束並行条件を定義した.

材料として,磁石は前述のNEOMAX-44H,ヨークは高い比透磁率と剛性をもち,加工性に優れるSS400を用いる.解析に用いた各定数をTable.3.1 に示す,本来SS400の材料値にはBH曲線を用いる必要があるが,今回試験する温度域では影響がないと考え,比透磁率だけを設定した.解析の結果をFig.3.3,特にチップを固定する場所の磁束密度の大きさをFig3.4 に示す.



Fig.3.2 FEM model(left : air model ; right : yoke and magnet model)

Table.3.1 Material properties used in the FEM analysis						
Ratio permeability of Air	1					
Ratio permeability of Yoke	5000					
Coercive force of Magnet (NEOMAX-44H)	1002.5 [kA/m]					



Fig.3.3 Result of FEM analysis(Vector plot)



Fig.3.4 Magnetic flux density of place where chip is fixed

Fig.3.4 の結果より,設計した磁石,ヨークはx方向の-60~60[mm]の区間において, MEMS マイクロミラーの駆動に必要な 0.3[T]以上の磁束密度を得ることができて いることがわかる.よって,試験機には-60~60[mm]の区間にチップをセットすれば よいこととなる.3.1.2 に示したチップホルダーの長さは 120[mm]であるので,磁束 密度が十分に安定している領域での試験が可能となる. 3.1.4 試験機本体の設計

試験機本体は,ベース部分と電源供給部からなっている.

試験中チップの振れ角を確認できるようにするため,試験機にチップを固定した 後に試験機を横に倒して試験を行う.このとき試験機が斜めになっていると正確な 試験が行えない可能性があるため,試験機は水平に保つ必要がある.ベース部分の 側面に高さ調整用のコックを取り付けることによって,試験機は3点支持されてい る状態になっており,このコックを調整することによって,どのような条件の恒温 恒湿槽での試験においても試験機を水平に保つことができる.

試験前,本体にチップホルダーをセットする必要がある.この作業を容易にする ために,電源供給部はリニアスライダーによって上下方向にスライドさせることが 可能となっている.ホルダーは電源供給部を上に持ち上げた状態で磁石の間にセッ トする.セット完了後には供給部を下ろして固定する.

電源の供給にはコンタクトプローブを使用する.コンタクトプローブとはスプリ ング内蔵のプローブであり,チップに接触して電源を供給すると共にチップを固定 する機能を持っている.電源供給部を下ろしコンタクトプローブがチップをしっか り固定している状態で供給部をベース部に固定することにより,試験中もチップを 確実に固定し続けることができる.また,試験中高温・高湿になるための試験機の 錆つきを防止するために,材料には表面処理をほどこした.全体図をFig.3.5 に示す.

この試験ではチップの振れ角を正確に測定する必要がある.振れ角はミラーにレ ーザー光を入射させ,その反射光を見ることで測定する.チップのミラー面にレー ザー光を直接入射できるようにするため,チップホルダーおよびその固定部の裏面 には穴があけてある.これにより,正確な振れ角測定が可能となる.



Fig3.5 Fatigue life testing machine (left: draft of testing machine; right: Actual testing machine)

3.2 試験方法

3.2.1 試験条件

MEMS マイクロミラーの疲労現象については,経験式[16]やアレニウスモデルより,温度,湿度,および光学振れ角度の3つのパラメータが影響すると考えられる. 本研究では,この3つのパラメータについて数種の環境での疲労寿命試験を行う必要があると考えられる.

本試験では日本信号(株)製の MEMS マイクロミラー(ECO SCAN-ESS115)を使用 して試験を行う.試験環境は,上に示す3つのパラメータ温度・湿度・振れ角につ いて,それぞれ2水準ずつ計4種類の環境で行う.条件の詳細を Fig.3.6 に示す.

また,今回使用したチップの形状を Fig.3.7 に示す.このチップは SOI ウェハから ドライエッチングで作られており,はりの寸法は幅 100µm × 長さ 2mm × 高さ 100µm 程度であり,共振周波数は約 550 [Hz]である.



Fig.3.6 Environment where fatigue life test is done



Fig.3.7 Configuration of MEMS micromirror

3.2.2 試験のセットアップ

チップは同じプロセス条件で作られているものの,それぞれに差異があり,共振 周波数が多少異なる.よって試験の前にチップの動作テストを行い,共振周波数を 求める必要がある.

まず,チップを固定したチップホルダーを試験機にセットする.電源供給部を下 方にスライドさせチップの電極に電源を接触させると共に,チップが上方にずれな いように固定する.専用の駆動回路を用いてチップに駆動電流を流し共振周波数を 探す.この共振周波数で試験を行っていく.共振周波数で駆動しているチップの振 れ角を Fig.3.8 のような振れ角測定装置を用いて測定しながら,チップが試験条件に 合う振れ角で駆動するようになるまで流す電流を増加させていく.これでチップの 動作テストが終了する.

本試験ではチップの駆動に」専用の駆動回路を使用する.この回路は試験中チップから発生する逆起電力をフィードバック制御することにより,試験中振れ角を一定に保つことが可能である.Table.3.2 試験中,恒温恒湿槽内部に Fig3.8 に示す角度 測定器と入れて測った光学振れ角と温度の関係について示す(湿度 62%).なお, 温度 60 以上で槽内のレーザーが発光しなくなるため,データは 60 までのものと なっている.

ruble:3:21(clution of Temperature and Timplitude angle							
T[]	30	40	50	60			
[deg.]	62	62	62	63			

Table.3.2Relation of Temperature and Amplitude angle

この結果より,温度上昇による振れ角の変化はほとんどないものと考えられる. また,そのわずかな変化についても,高温になるほど振れ角は増加していくと考え ら得るため,恒温恒湿槽外の通常環境において計測した振れ角を利用することは安 全側の評価になる.

動作テストが完了した後,試験条件をセットした恒温恒湿槽に試験機本体をいれ, 試験を開始する.このとき,試験機以外の装置は槽外部にあり,槽に開いている穴 に通しているケーブルを通して槽内の試験機に電源を供給している.

試験は長時間かかるため,駆動状況を随時モニターしておく必要がある.試験中, チップの動作確認のため KEYENCE(株)製データロガーNR-2000 を使用してサンプ リングタイム 250[msec]で逆起電力値を収集した.チップが停止すると逆起電力の発 生が止まり破断までの時間を知ることができる.チップの駆動回路とデータ収集装 置を Fig.3.10 に示す. 今回使用する恒温恒湿槽は㈱カトー製の SSE-44CR-A である.有効槽内寸法: W600×D600×H800[mm]で,温度制御精度は±1.0[°C],湿度制御精度は±3.0[%RH]で ある。作動環境範囲を Fig.3.11 に示す.



Fig.3.8 Angle measuring instrument



Fig3.9 Temperature and Humidity testing Chamber (Fatigue life testing machine is entered)



Fig.3.10 Drive circuit and Data collecting systems



Fig.3.11 Working range of Temperature and Humidity testing Chamber

第4章 結果

疲労寿命試験の結果を示す.Fig.4.1 に温度 80[],湿度 60[%],振れ角 60[deg.]での 逆起電力の計測結果の一例を示す.駆動中の逆起電力の値はほぼ一定になっているた め,起動中の振れ角変動はほぼなかったものと考えられる.



Fig.4.1 Result of Fatigue life testing (Temperature 80[]] Humidity 60[%] Amplitude angle 60[deg.])

次に,疲労寿命試験の結果をそれぞれの環境ごとにまとめた結果を Table.4.1 に示す. 試験はそれぞれの環境につき 5~6 サンプル行った.

Table.4.1 Result of Fatigue life test according to environment

	試験条件	平均寿命[h]	分散	サンプル数
80[] 80[%] 70[deg.]	0.82	5.71E-01	5
80[] 80[%] 60[deg.]	0.61	2.82E-01	6
60[] 80[%] 60[deg.]	40.68	1.57E+03	5
80[] 60[%] 60[deg.]	56.61	1.09E+03	5

この結果より,温度依存性,湿度依存性については有意差のある試験が行えたこと がわかる。振れ角依存性については,環境が厳しすぎたため寿命が非常に短くなって しまい,その差を見ることができなかった.寿命の振れ角依存性の確認のためには, 更に振れ角の小さな試験を行うか、温度、湿度共に低い環境において試験を行う必要 があると考えられる.

次に Table.4.2 に個々の試験結果を示す.

T[K]	Р	[deg.]	x[hour]
353	0.8	70	2.22
353	0.8	70	0.21
353	0.8	70	0.10
353	0.8	70	0.82
353	0.8	70	0.76
353	0.8	60	0.15
353	0.8	60	0.04
353	0.8	60	1.17
353	0.8	60	0.71
353	0.8	60	1.35
353	0.8	60	0.23
333	0.8	60	111.30
333	0.8	60	43.48
333	0.8	60	1.23
333	0.8	60	91.24
333	0.8	60	35.78
353	0.6	60	64.38
353	0.6	60	0.35
353	0.6	60	0.37
353	0.6	60	70.70
353	0.6	60	67.60

T-1.1. 4.2 D ----14 - 6 D-4; ---- 1; 6

第5章 考察

5.1 酸化膜の影響

シリコンには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いること は序論にも述べたとおりである.破壊のメカニズムについてはまだ定かではないが, Muhlsteinら[10-12]は破壊に至るメカニズムとして,シリコン表面の酸化膜の影響を 示唆している.シリコンの表面にはノッチングなどのエッチングダメージが存在する. まず,シリコンに酸化膜が形成され,このエッチングダメージを基点としたき裂が生 じる.さらにそのき裂先端で酸化発生し,この繰り返しによってき裂が徐々に進展し ていると推測されている.

そこで,本試験を行ったチップの酸化膜厚さの増加を計測し,酸化膜形成の破断への影響を確かめる.酸化膜厚さ測定にはエリプソメーターを使用した.試験前のデバイスのミラー部と80[],60[%],60[deg.]100時間耐久試験後のデバイスのミラー部の酸化膜厚測定を行った.

Fig.5.1,Fig.5.2はエリプソメーターを使用した酸化膜計測によって得られたフィッ ティング結果 と の値である.緑色の点線が測定データ、赤色の実線が光学モデル により算出されたシミュレーションデータを示している.この2つのグラフがよく重 なっていることから,膜厚測定に対するフィッティング解析が精度よくできたことが 分かる.Table.5.1に測定と解析から求められた酸化膜厚さの比較を示す.



Fig5.1 Experiment Ψ data and Generated Ψ data



Fig5.2 Experiment Δ data and Generated Δ data

SiO2	4.74nm		
Si	0.10mm		
SiO2	6.13nm		
Si	0.10mm		
	SiO2 Si SiO2 Si		

Table.5.1 Measurement result of oxide film

高い温度・湿度という環境下において,酸化膜厚さが増加していることが確かめられる.しかし,本試験で使用しているサンプルサイズが100µm であることを考えると,その差は2nmと小さく酸化膜形成が疲労の直接的な原因ではないと考えられる. Muhlsteinら[10-12]によるシリコン破断メカニズムだが,本研究のサンプルサイズではその効果が支配的であるとは考えにくい.

しかし,本測定で計測したのはミラー部であったため高応力状態にあるはりにおいては,さらに酸化が進んでいる可能性も考えられる.

5.2 結果データの各パラメータによる整理

本試験では疲労という非常にばらつきが多い現象に対して 3 つのパラメータに ついて試験を行っている.そのため,3パラメータを考慮する前に,個々のパラメ ータについてのデータ整理を行う.

5.2.1 湿度による整理

湿度によるシリコンの寿命には、電子デバイスで用いられている経験式 $x \propto P^{-4.1}$ [16]がある.この経験式を使って整理した結果を Table.5.2 に示す.

T[K]	Р	[deg.]	x[hour]	$P^{-4.1}$
353	0.8	60	0.15	2.496497
353	0.8	60	0.04	2.496497
353	0.8	60	1.17	2.496497
353	0.8	60	0.71	2.496497
353	0.8	60	1.35	2.496497
353	0.8	60	0.23	2.496497
353	0.6	60	64.38	8.120446
353	0.6	60	0.35	8.120446
353	0.6	60	0.37	8.120446
353	0.6	60	70.70	8.120446
353	0.6	60	67.60	8.120446

Table.5.2 Result of Fatigue life test attention to humidity

実験値 x については湿度 80[%]と 60[%]を比較すると, $10^1 \sim 10^2$ オーダーの 差がある.一方,経験式による計算値を比較すると, $10^0 \sim 10^1$ オーダーの差と なり,実験値の差よりも小さな値となった.しかし, $P^{-4.1}$ の乗数の絶対値 4.1 を更に大きくとることにより, 2 つの環境に対する寿命の湿度依存評価が可能に なると考えられる.

5.2.2 温度による整理

温度と寿命の関係については,アレニウスモデルの式 $x \propto \exp(E/kT)$ がよく使われる.ここで,Eは活性化エネルギー,kはボルツマン定数である.この式を使って整理した結果をTable.5.3 に示す.

T[K]	Р	[deg.]	x[hour]	$\exp(E/kT)$
353	0.8	60	0.15	1.89E+13
353	0.8	60	0.04	1.89E+13
353	0.8	60	1.17	1.89E+13
353	0.8	60	0.71	1.89E+13
353	0.8	60	1.35	1.89E+13
353	0.8	60	0.23	1.89E+13
333	0.8	60	111.30	1.19E+14
333	0.8	60	43.48	1.19E+14
333	0.8	60	1.23	1.19E+14
333	0.8	60	91.24	1.19E+14
333	0.8	60	35.78	1.19E+14

Table.5.3 Result of Fatigue life test attention to temperature

実験値 x については温度 353[K]と 333[K]を比較すると, 10²オーダーの差が ある.一方,経験式による計算値を比較すると, 10¹オーダーの差となり,実験 値の差よりも小さな値となっている.しかし, *E/k* がさらに大きな値をとるこ とにより温度依存性による寿命の評価が可能であると考えられる.

5.2.3 振れ角による整理

振れ角と寿命の関係について, Table.5.4 に示す.

T[K]	Р	[deg.]	x[hour]
353	0.8	70	2.22
353	0.8	70	0.21
353	0.8	70	0.10
353	0.8	70	0.82
353	0.8	70	0.76
353	0.8	60	0.15
353	0.8	60	0.04
353	0.8	60	1.17
353	0.8	60	0.71
353	0.8	60	1.35
353	0.8	60	0.23

Table.5.4 Result of Fatigue life test attention to temperature

この結果を見てみると,振れ角の違いによる実験値 x の違いは見えてこない. これは,試験条件が厳しすぎたため,振れ角依存性が見えなくなってしまってい るものと考えられる.

本試験データを使って寿命の推定をするにあたって,振れ角依存性を考慮に入れたとしても,試験データに差異がないためにかえって推定が不適正になるおそれがある。

5.3 寿命の外挿

MEMSマイクロミラーの通常環境下での寿命を推定するために,加速寿命試験 データを用いて疲労寿命の評価式を作る.ただし,寿命に物理的な意味が含まれ, かつ試験の再現性が良いように評価式を設定した.疲労寿命*L*,の評価式として式 (2.1)のようなモデル式を立てた.*A*,*B*,*C*は実験にあわせ込むパラメータ,*P*[%]は 湿度,*T*[K]は温度である.なお,5.2.3の結果を踏まえ,振れ角に関する評価は 行わないこととした.

$$L_f = AP^{-B} \exp\left(\frac{C}{T} - D\phi\right)$$
(2.1)

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[16]を参考に, 疲労寿命が湿度の累乗に比例すると仮定した.

$$L_f \propto p^{-B} \tag{2.2}$$

温度 7 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 (2.3)のようなアレニウスモデルの式を用いた.

$$L_f \propto \exp\left(\frac{C}{T}\right)$$
 (2.3)

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(2.4)を用いた.ただし,ミラーの振れ角 φ[°](光学角)と応力振幅が比例関係にあると考え,式(2.4)は振れ角の式とした.

$$L_f \propto \exp(-D\phi) \tag{2.4}$$

式(2.2)~(2.4)の積を取った式(2.1)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[10-12]はあるが、詳細はわかっていない[14].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,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.また,振れ角については5.2.3 でも述べた通り,適正な推定を行えない可能性があるので,今回は考慮しないこ ととした.

ここで,本来ならA, B, Cの3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(2.5)に示す寿命xの対数正規分布の確率密度関数f(x)中のx₀に式(2.1)の L_fをあてはめてA, B, C及び を最尤法により決定する.ここで, は対数標準偏差である.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\zeta} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2\zeta^2}\right)$$
(2.5)

以下,最尤法によるパラメータ決定までの手順を示す. サンプルが破壊した場合最尤方程式は式(2.5)のようになるので,尤度,対数尤 度は式(2.6),(2.7)のようになる.ここで,*A*,*B*,*C*,*ζ*について最尤推定量は式 (2.8)~(2.11)を満たす.Table.4.2のデータを使って式(2.8)~(2.10)から*A*,*B*,*C* を決定し,式(2.11)に代入して対数標準偏差 を決定する. 計算の結果,それぞれ1.70E -24 [cycle], 14.85, 17828 [K],及び7.40 となっ た.

$$l_{i}(A, B, C, \zeta \mid x_{i}, P_{i}, T_{i}) = f(x)$$
(2.5)

尤度 :
$$L_f(A, B, C, \zeta) = \prod_i l_i$$
 (2.6)

対数尤度 :
$$\ln L_f = \sum_i \ln l_i$$
 (2.7)

$$\frac{\partial}{\partial A} \ln L_f = 0 \quad ; \quad \sum_i \left\{ \ln A - \left(\ln P_i \right) B + \left(\frac{1}{T_i} \right) C \right\} = \sum_i \ln x_i \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial}{\partial B} \ln L_f = 0 \quad ; \quad \sum_i \ln P_i \left\{ \ln A - \left(\ln P_i \right) B + \left(\frac{1}{T_i} \right) C \right\} = \sum_i \ln P_i \ln x_i \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial C} \ln L_f = 0 \quad ; \quad \sum_i \left\{ \ln A - \left(\ln P_i \right) B + \left(\frac{1}{T_i} \right) C \right\} / T_i = \sum_i \ln x_i / T_i \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial} \ln L_f = 0 \quad ; \quad \sum_i \left\{ \ln x - \ln A + \left(\ln P_i \right) B - \left(\frac{1}{T_i} \right) C \right\}^2 = 2 \quad (2.11)$$

5.4 過去の研究結果との比較

5.4.1 本試験と過去の試験の違い

恒温恒湿槽を使って行った加速試験だが,過去に日本信号(株)でも行われている.その試験は,本試験でも利用した「ECO SCAN」の製品を使って行われたものである.しかし,振れ角については通常環境である槽外部で一度測定しただけの結果であり,槽内の加速寿命環境下での正確な振れ角を示している保証はない.本試験では,チップの駆動時 Table.3.1 で示すとおり槽外部の環境下と槽内部の環境下においてほとんど振れ角の変化がないことを確かめた.このことにより,恒温恒湿槽で管理されている温度,湿度に加えて,振れ角についてもかなり正確な試験が行えたものと考えられる.

5.4.2 2 試験の比較検討

泉ら[18]は,振れ角±34°,40°,50°,55°,60°,70°,80°,温度は20 と 85 ,湿度は25%と80%の条件で実験データ(前述の過去データ)を用いて,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.実際は振れ角依存性につ いても考慮されているが,本研究の評価式に合わせて振れ角の影響を無視した. 結果は式(2.1)を寿命評価式とするとき,*A*,*B*,*C*,*ζ*はそれぞれ 8.62E-6 [cycle], 3.253,4656 [K],及び1.83 となった.

(本研究の寿命評価式
$$L_f = (1.70e - 24)P^{-14.85} \exp\left(\frac{17828}{T}\right)$$
 (=7.40) (2.12)

過去データによる寿命評価式

$$L_f = (8.62e - 6)P^{-3.253} \exp\left(\frac{4656}{T}\right)$$
 (=1.83) (2.13)





Fig.5.3 Experimental data and 90% prediction interval

of the fatigue life of MEMS micromirror (Humidity 80 %)

これより,実験データはすべて90%予測区間内に収まっていることが分かる.

同様に, Fig.5.4 に湿度 80[%]の加速寿命環境において過去に行われた寿命試験 データ(温度と寿命との関係)と,泉らの研究で提案された 90%予測区間を示 す.





こちらも,実験データはすべて90%予測区間内に収まっていることが分かる. ここで,本研究の寿命評価式における対数標準偏差7.40は,過去のデータを用い た寿命評価式における対数標準偏差1.83と比べて大きな値となっているため, 90%予測区間の幅が非常に広くなっていることが分かる. 次に,日本の標準環境(1971-2000年の東京の気象データ:平均湿度63%)における, 温度と寿命との関係の90%および50%予測区間の下限値を本試験についてFig.5.5に, 同様に,過去のデータについてFig.5.6示す.



Fig.5.5 Lower 90% and 50% prediction interval of the fatigue life of MEMS micromirror (Humidity 63 %)



Fig.5.6 Lower 90% and 50% prediction interval of the fatigue life of MEMS micromirror (Humidity 63 % : Previous data was used)

どちらの試験についても振れ角 60[deg.]程度の時の結果を示している.実機を 60[deg.]で使用すると仮定して,5時間(1E+7サイクル)の寿命を目標とするために は本試験の結果では,30[]程度の環境で使用する必要があり,過去のデータを用 いた結果では,40[]程度の環境で使用する必要があることが分かる.

振れ角について有意なデータがある場合も,5.3からここまでの寿命外挿手順を 踏むことにより,通常環境下での疲労寿命評価を行うことが可能である.

第6章 結論

本研究においては,疲労寿命試験機を開発し,試験機を使った加速寿命環境下での耐 久試験を行うことにより,通常使用環境での疲労寿命を外挿する手法を提案した.実際 に開発した試験機を使った耐久試験の結果をもとに以下のような結論を得た.

- 振れ角測定のための機構を工夫したその結果、試験中の正確な振れ角測定が可能になった
- ・ 実機の疲労寿命試験を効率的(十分なサンプル数で)に行うことが可能になった
- ・ 加速試験結果を用いた、通常環境への外挿方法を提案し,本試験で対象とした ESS115 チップの寿命を外挿した

付録A「FEM によるマイクロミラー応力状態解析」

本試験で使用するチップ「ECO SCAN - ESS115」は非常に微小であり,試験にお いて大きな変形をすることなどから,応力を直接計測することはできない.そこで, ミラーの振れ角と応力の関係について有限要素法(FEM)を用いた.解析には有限要素 法解析ソフト ANSYS を使用した.モデルは六面体二次要素 SOLID95 を使用して Fig.A.1 のようにモデリングを行った.要素数 4436 節点数 25457 となっている.



Fig.A.1 FEM model(ECO SCAN -ESS115)

境界条件は周辺部分を z 軸方向固定(単純支持),さらにチップの回転を防ぐために, 4 隅から極めて近い点から 2 点選びそれぞれ x 軸方向, x, y 軸方向固定とする拘束 条件を与えた.

また,試験片の材料である単結晶シリコンは,異方性材料であるため,計算には異 方性の弾性定数を用いた.計算に用いた各定数をTable.A.1 に示す.

TableA.1 Material properties used in the FEM analysis ; The values are based on the elastic constants of x:[110],y:[110],z:[001]

E_x	E_y	E_{z}	V_{xy}	V_{xz}	V_{yz}	G_{x}	G_y	G_z	
168,9	168.9	130.2	0.064	0.361	0.278	50.9	79.4	79.4	

解析ではミラー部がねじれるように荷重を与えて解析を行った. FigA.2 にはり に注目した解析結果の一例を示す.また, FigA.3 に振れ角と最大応力の関係について 示す.



Fig.A.2 Result of FEM analysis (principal stress distribution)



Fig.A.3 より,およそ が 1[deg.]ごとに最大主応力が約 27[MPa]増加していることが分かる.

付録 B 過去の試験データ

参考として,泉ら[18]の使用した日本信号(株)で行われた測定データを Table.B.1, Table.B.2 に示す.ただし,この試験では,デバイス駆動中におけるミラー振れ角につ いて不明瞭な点がある.

試験条件 サンプル数 寿命[h] 分散 3 85[] 80[%] 80[deg] 0.19 6.42E-03 85[] 80[%] 70[deg] 9.27 2.99E+01 3 85[] 80[%] 60[deg] 146.28 6.90E+03 3 3 20[] 80[%] 70[deg] 151.33 2.60E+03 85[] 25[%] 70[deg] 479.00 1.30E+05 3

Table.B.1 Result of Fatigue life test according to environment

10	rable.D.2 Result of I aligue file test				
T[K]	Р	[deg]	x[hour]		
358	0.8	80	0.08		
358	0.8	80	0.25		
358	0.8	80	0.25		
358	0.8	70	5.16		
358	0.8	70	5.66		
358	0.8	70	17.00		
358	0.8	60	60.00		
358	0.8	60	120.33		
358	0.8	60	258.50		
293	0.8	70	85.00		
293	0.8	70	160.00		
293	0.8	70	209.00		
358	0.25	70	130.50		
358	0.25	70	331.50		
358	0.25	70	975.00		

Table B 2 Result of Fatigue life test

付録C 疲労寿命試験機設計図

以下に本研究で設計した疲労寿命試験機の設計図を掲載する.

名称	型番	個数	メーカー
ベース 1		1	
^ [*] - X 2		1	
ペース 3		1	
プローブヘッド		1	
プロープ ヘッド ホルダ ー 1		1	
プロープ ヘッド ホルダ ー 2		1	
プローブヘッドホルダー 3		1	
リニアスライダ ー ベース 1		1	
リニアスライダ ー ベース 2		1	
チップホルダー		1	
チップホルダーヘース		1	
電極プレート		1	
マクネット		2	
3-7		1	
位置決めシャフト		2	
位置決めパーツ1		1	
位置決めパーツ2		1	
スライド ガイド	SEB10-95	2	ミスミ
シャフト	SFAM6-25-F6-B6-P6-T6-S6-Q6	1	ミスミ
にぎり玉	PCA6-20-R	1	ミスミ
ローレットノフ゛	NOOS6-20	3	ミスミ
コンタクトフ゛ローフ゛	NP30-G	20	ミスミ
リセプタクル	NR30K-C	20	ミスミ
	名	部品	表







図名	疲労試験装置完成図		
材質		個 数	









図名	ベース2		
材質	A5052	個数	1

















図名	プローブヘッドホルダー2		
材質	A5052	個数	1



図名	リニアスライダーベース1		
材質	A5052	個数	1





図名	リニアスライダーベース2		
材質	A5052	個数	1







I N N	N N	電極プレート			
木昏	才雪	POM(黒)	個数	1	









図名	位置決めパーツ2		
材 質	A5052	個数	1





図名	位置決めシャフト		
材質	SUS303	個数	2

あとがき

謝辞

本研究は,酒井教授と泉助教授の下におこなわれた研究です.本研究室には修士から 入ってきたために,右も左も分からない状態でした.研究を行うにあたって助けていた だいた皆様に,ここで感謝を申し上げたいと思います.

酒井先生には,研究を行うにあたって的確なアドバイスをいただき,自分の進む方向 性を示していただき自分を見つめなおすよい機会になりました.

泉先生には,研究全般にわたりご指導いただき,何をしていいのか悩んでいる私を的 確に導いていただきました.また,研究以外の時間にお話したことも,私にとっては貴 重な財産になったと思っております.

また,日本信号株式会社の上田様,鈴木様,河村様には試験サンプルだけではなく, 試験機の設計や試験方法などについて貴重なご意見をいただき,大変感謝いたしており ます.また半年近くにわたり会社内に研究スペースをいただき,歓迎会も行っていただ くなど非常によくしていただきました.お忙しい中本当にありがとうございました.

産業安全研究所の山際さんには SEM や顕微鏡などの設備を貸していただき、また、 IHIの高梨さんには破面観察や加工業者の紹介など非常にお世話になりました. 私の我 侭とも言える質問に丁寧にお答えくださり、本当に感謝に堪えません.

研究室で M2 の同期の小林君には,研究だけではなく,授業や研究室の行事などを通 してお世話になりました.私が不甲斐ないばかりにいつも迷惑をかけてしまいましたが, どんなことにも素早く対応してくれて助かりました.二人とも就職してしまいますが, 今後ともよろしく.本当にありがとう.

その他,助手の原さんをはじめとする研究室の皆様や,私の研究を助けていただいた 皆様に深く感謝をしております.

この二年間,人生と比べてしまえば非常に短い期間なのかもしれませんが,とても密度の濃い経験をすることができたと思います.この経験を糧としこれからもがんばってゆこうと考えております.

最後にもう一度.本当に皆様ありがとうございました.

参考文献

- N.Asada, H. Matsuki, K. Minami, M. Esashi, "Silicon Micromachined Two-Dimensional Galvano Optical Scanner", IEEE Transactions on Magnetics, 30(1994), 4647-4649
- [2] Jin-H. Lee, Y.-C. Ko, D.-H. Kong, J.-M. Kim, K.B. Lee, D.-Y. Jeon,"Design and fabrication of scanning mirror for laser display", Sensors and Actuators A, 96(2002), 223-230
- [3] David L. Dickensheets, and Gordon S. Kino, "Silicon-Micromachined Scanning Confocal Optical Microscope", Journal of Microelectromechanical Systems, 7,-1(1998),38-47
- [4] S. Eliahou-Niv, "Design, analysis and fabrication of a new MEMS scanning devise actuator", Applied Surface Sicience, 248(2005),503-508
- [5] Peter F. Van Kessel, Larry J.Hornbeck, Robert E. Meier, and Michael R.Douglass, "A MEMS-Based Projection Display", Proceedings of the IEEE,86,No8(1998),1687-1704
- [6] Paul M. Zavracky, Sumit Majumder, and Nicol E. McGruer, "Using Nickel Surface Micromashining", Journal of Microelectromechanical Systems, 6-1(1997),3-9
- [7] Hiroshi Toshiyoshi and Hiroyuki Fujita, "Electrostatic Micro Torsion Mirrors for an Optical Switch Matrix", Journal of Microelectromechanical Systems,5-4(1996),231-237
- [8] 泉 聡志, チャン・ウェー・ピン, 山口 真, 酒井信介, 上田 譲, 鈴木 敦, "MEMS 光ミラーの強度解析のための試験片と評価手法の開発", 日本機械学会論 文集 A 編 71-703(2005),387-393
- [9] 山口 真, "MEMS マイクロミラーの強度に及ぼすエッチングダメージの影響",
 修士論文,東京大学大学院(2005)
- [10] C. L. Muhlstein, S. B. Brown, R. O. Ritchie, "High-Cycle Fatigue of Single-Crystal Silicon Thin Films", Journal of Microelectromechanical Systems, 10-4(2001), 593 -600

[11] C. L. Muhlstein, S. B. Brown, R. O. Ritchie, "High-cycle fatigue and durability of

polycrystalline silicon thin films in ambient air", Sensors and Actuators A, 94(2001), 177-188

- [12] C. L. Muhlstein, R. T. Howe, R. O. Ritchie, "Fatigue of polycrystalline silicon for microelectromechanical system applications: crack growth and stability under resonant loading conditions", Mechanics of Materials, 36(2004), 13-33
- [13] H. Kahn, R. Ballarini, J. J. Bellante, A. H. Heuer, "Fatigue Failure in Polysilicon Not Due to Simple Stress Corrosion Cracking", Science, 298-8(2002), 1215-1218
- [14] H. Kahn, R. Ballarini, A. H. Heuer, "Dynamic fatigue of silicon", Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8(2004), 71-76
- [15] Xialdong Li, Bharat Bhushan, "Fatigue studies of nanoscale structures for MEMS/NEMS applications using nanoindentation techniques", Surface and Coatings Technology, 163-164(2003), 521-526
- [16] 大見忠弘,新田雄久 監修,"シリコンの科学", リアライズ理工センター(1996), 504
- [17] 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",日科技連(1992),154
- [18] 泉 聡志、門脇政幸、酒井信介、上田譲、鈴木敦、"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"材料(2006)印刷中

<u>以上</u>

<u>p.1~58 完</u>

<u>修士論文</u>

<u>平成 18 年 2月 10 日 提出</u>

46202 笹尾 邦彦