

修士論文

ねじり荷重を受けるMEMSアルミ配線の
疲労挙動と長期信頼性

p.1 ~ 53 完

平成 20 年 2 月 8 日提出

指導教員 泉 聡志 准教授

66202 久保寺 裕典

目次

第1章 序論	6
1.1 研究の背景	7
1.1.1 周期荷重を受けるMEMS部材の長期信頼性.....	7
1.1.2 薄膜の疲労	7
1.1.3 SAWデバイスにおけるアルミ配線の疲労	9
1.2 研究の目的	11
1.3 本論文の構成	11
第2章 手法	12
2.1 研究の進め方	13
2.2 配線観察.....	13
2.2.1 使用サンプル.....	13
2.2.2 実験	15
2.3 ねじりを受けるアルミ配線の応力分布	17
2.4 デバイスの性能変化.....	19
第3章 結果	20
3.1 配線観察結果	21
3.2 配線の応力解析解析結果.....	25
3.3 デバイスの性能変化調査結果	28
第4章 考察	31
4.1 ダメージ形成	32
4.2 共振周波数変化の検証	34
4.2.1 FEM固有振動数解析.....	34
4.2.2 解析結果	36
4.2.3 ボイド率と弾性係数の関係	38
4.3 安定化のメカニズム.....	39
第5章 結論	40
付録A トーションバーのひずみ速度	42
付録B 粗さ解析	43
付録C 共振周波数・電流値変化データ	45
参考文献	51

目次

Fig. 1.1 Extrusions at the surface generated by dislocation movement[4]	8
Fig. 1.2 Grooving at the surface generated by diffusion process[4].....	8
Fig. 1.3 FIB image of 420nm thin pure Al electrodes stressed by SAW[5].....	9
Fig. 1.4 Mechanism of damage formation[5]	10
Fig. 2.1 Schematic diagram of samples used in this research.....	14
Fig. 2.2 A cross section of torsion bar (the dimension is the same as that of samples used in this research)	14
Fig. 2.3 Process flow for Al-wiring fabrication.....	14
Fig. 2.4 Experimental setup	15
Fig. 2.5 The method to measure the angle of twist	15
Fig. 2.6 Laser microscope VK-9510 used in this experiment	16
Fig. 2.7 FEM model for measuring stress distribution in Al thin film.....	17
Fig. 2.8 The model deforms like this figure by forced displacement	18
Fig. 2.9 The schematic of experimental setup.....	19
Fig. 2.10 Environmental conditions at which the experiment was done.....	19
Fig. 3.1 Micrographs show the damage formation by cyclic torsional load.....	22
Fig. 3.2 Micrographs show the details of the surface damage.....	23
Fig. 3.3 Roughness parameter R_z vs loading time	24
Fig. 3.4 Al thin film deforms like this figure by torsional load	25
Fig. 3.5 Distribution of τ_{xy} on the film surface.....	26
Fig. 3.6 Distribution of τ_{xy} on the cross section of the film.....	26
Fig. 3.7 Distribution of hydrostatic stress on the film surface.....	27
Fig. 3.8 Distribution of hydrostatic stress on the cross section of the film	27
Fig. 3.9 Frequency shift vs loading time ($T=25$)	29
Fig. 3.10 Electric current shift vs loading time ($T=25$)	29
Fig. 3.11 Frequency shift vs loading time ($\varphi=20^\circ$).....	30
Fig. 3.12 Electric current shift vs loading time ($\varphi=20^\circ$).....	30
Fig. 4.1 FEM model for eigenfrequency analysis.....	35
Fig. 4.2 Relative eigenfrequency shift due to the change of the density and the Young's modulus	37
Fig. 4.3 Relative eigenfrequency shift due to the change of film thickness	37
Fig. A.1 Torsionally loaded cylindrical rod	42
Fig. B.1 Definition of R_z	44

Fig.C.1 Frequency shift vs loading time(first 3 hours) (T=25).....	45
Fig.C.2 Electric current sift vs loading time(first 3 hours) (T=25).....	45
Fig.C.3 Frequency shift vs loading time(first 3 hours) ($\varphi=20^\circ$)	46
Fig.C.4 Electric current sift vs loading time(first 3 hours) ($\varphi=20^\circ$).....	46

表目次

Table 2.1 Principal specification of the laser microscope.....	16
Table 2.2 Material constants used in FEM analysis.....	18
Table 4.1 Material constants used to estimate diffusion coefficient.....	33
Table 4.2 Estimated diffusion time.....	33
Table 4.3 Material constants used in eigenfrequency analysis	35
Table C.1 Frequency and electric current shift (15°25)	47
Table C.2 Frequency and electric current shift (20°25)	47
Table C.3 Frequency and electric current shift (25°25)	48
Table C.4 Frequency and electric current shift (31°25)	48
Table C.5 Frequency and electric current shift (20°65)	49
Table C.6 Frequency and electric current shift (20°85)	50

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 周期荷重を受ける MEMS 部材の長期信頼性

近年開発が進められている MEMS の代表的な駆動方式の一つに共振駆動がある。この駆動方式では、振動系内部においてのエネルギーロスが少ないためデバイスを大きく、周期的に変形させることが可能となる[1]。この変形によりデバイスの構造部材は周期的な曲げ荷重やねじり荷重を受けることになるため、デバイスの長期信頼性確保にあたってはこの部位における基板や上部の配線薄膜の疲労挙動を明らかにする必要があると考えられる。

近年、次節以降に詳しく述べるように、配線薄膜の厚さあるいは結晶粒径が小さくなるにつれて配線にはバルク材とは異なるメカニズムでの疲労ダメージが発生することが確認されている。また共振周波数で駆動する MEMS 配線の疲労ダメージがデバイスの共振周波数を変化させることが報告されている。よって、本研究では周期ねじり荷重をうけるアルミ配線薄膜の疲労に着目する。

1.1.2 薄膜の疲労

金属膜の寸法が数 μm 以下になると、転位の動きが拘束されることによる流動応力の変化により、塑性変形の挙動は大きく影響を受ける[2]。多結晶膜において流動応力は膜厚 400nm までは膜厚の逆数に比例して増加するが、さらに膜厚を低下させても流動応力は変化しないことが知られている。このため、ある程度厚い膜においては基板との界面から表面へと達する転位が運動し、Fig. 1.1 に示すようなバルク材の疲労によるダメージによく似たプレート状の突き出しが観察されるが、膜厚が薄くなるにつれてこの様な突き出しは観察されなくなり、Fig. 1.2 に示す様な結晶粒界におけるき裂が破壊の原因となる[3]。G.P.Zhang らは、疲労による突き出し、き裂、転位構造の形態は膜厚と結晶粒径に支配され、いずれかの寸法が約 $1\mu\text{m}$ を下回るとバルク材に見られる様な転位壁やセル構造は見られなくなり、粒界に沿ったき裂、突き出し、ポイドに取って代わるとしている[4]。



Fig. 1.1 Extrusions at the surface generated by dislocation movement[4]



Fig. 1.2 Grooving at the surface generated by diffusion process[4]

1.1.3 SAW デバイスにおけるアルミ配線の疲労

周期的せん断応力を受ける MEMS デバイスとして、無線 LAN などの無配線機器において周波数フィルタとして用いられる SAW (Surface acoustic wave) デバイスがある。このデバイスは AC 電圧を櫛形構造に加えることで電極間に電場を作り、基板表面を周期的に変形させる。AC 信号の周波数がデバイスの共振周波数と等しくなると表面に定在波ができる。この時構造中の櫛型構造部の配線 (膜厚 $4.2\ \mu\text{m}$ 程度) にはせん断応力が発生する。C. Eberl ら [5] はこの SAW デバイスにおける周期的せん断応力を受けるアルミ薄膜の常温での疲労ダメージの分析を行った。Fig. 1.3 に 3.2×10^{12} サイクル後配線にできたダメージの様相を示す。

ダメージは (1) 粒界のポイド (2) 表面における突き出し (高アスペクト比) (3) 消えた粒界 (4) 表面から突き出た結晶粒 に分類できる。また、ダメージ形成が進行するにつれて、デバイスの共振周波数が低下することが確認されており、ダメージの密度と共振周波数変化量の間に線形な関係があることから配線の疲労ダメージが直接的にデバイスの性能変化を引き起こしていることが示されている。

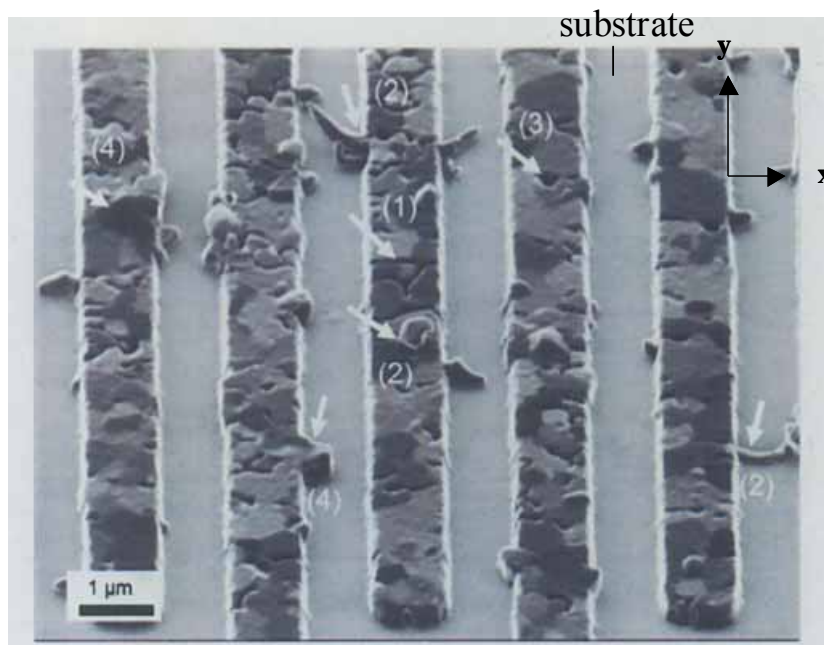


Fig. 1.3 FIB image of 420nm thin pure Al electrodes stressed by SAW[5]

また ,C.Eberlらはダメージ形成メカニズムを次のように説明している .SAW
によって配線に発生する周期的応力の主成分はせん断応力 τ_{yz} であり ,この成
分は基板に平行な転位を活性化させる .この転位はXRD手法により ,すべり面
が基板に平行であることが分かっており ,結晶粒は結晶粒中の面方向に依存し
て配線中の応力勾配により一方向に移動する .この際Fig. 1.4 に示す様に結晶粒
界において圧縮応力が働く箇所には突き出し(図中の白矢印) ,引張り応力が働
く箇所にはポイドが発生する (E , H , J) .

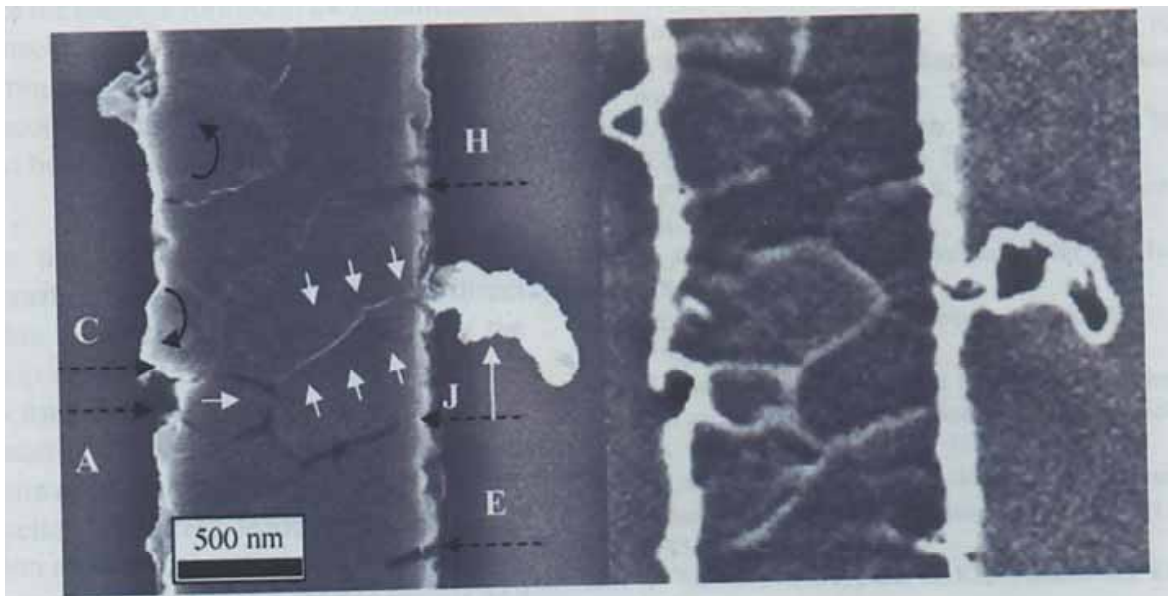


Fig. 1.4 Mechanism of damage formation[5]

1.2 研究の目的

1.1.2.に記した通り，薄膜の疲労メカニズムは薄膜の結晶粒サイズ/膜厚によって変化する．従って本研究においては，周期ねじり荷重を受ける配線薄膜を構造中にもつ，共振駆動の MEMS 実機を模擬したサンプルを用いて，この荷重形態，配線寸法におけるアルミ配線の疲労現象を明確化する．また，疲労現象の進行に伴い発生するであろう共振周波数の変化といったサンプルの性能変化を計測し配線ダメージとの関連について検証する．

1.3 本論文の構成

第 1 章 序論 では，本研究の背景について概説し，本研究の目的を示した．

第 2 章 手法 では，配線に形成される疲労ダメージの明確化，及びサンプルの性能に与える影響を調査するために行った実験及び解析の手法について示す．

第 3 章 結果 では実験，解析から得られた結果について示す．

第 4 章 考察 では，実験及び解析から得られた結果を元にダメージの形成，配線ダメージがサンプルの共振周波数に与える影響，現象安定化のメカニズムについて考察する．

第 5 章 結論 では，本研究を通して得られた結論を述べる．

第2章 手法

2.1 研究の進め方

序章に示した通り，配線薄膜の疲労現象は膜厚によって変化する．そこで，本研究では周期ねじり荷重を受ける配線を持つ MEMS 実機を模擬したサンプルを用意し連続動作させた際配線に形成される疲労ダメージの観察を行なった．また，ダメージ形成に関わる応力成分を調べるため，FEM 解析によりねじり荷重を受けるアルミ配線の応力分布を調べた．また，連続動作に伴うサンプルの性能変化の調査を行った．

2.2 配線観察

2.2.1 使用サンプル

Fig. 2.1 に本研究で用いたサンプルの概略図を示す．このサンプルは共振周波数(約 1270Hz)の交流電流で駆動し，Fig. 2.1 における可動部は周期的に傾けられる．また，電流値を調節することで可動部の振れ角を変化させることが可能である．可動部が動作することにより Fig. 2.1 におけるトーションバー部は周期的なねじり荷重を受ける．このトーションバー部は Fig. 2.2 の断面図が示す様に，シリコン基板の上にアルミ配線，保護膜と積みあがった構造をしている．Fig. 2.3 にサンプルの製造工程を示す．

このサンプルを用いることによりねじり周期荷重を受けるアルミ配線の疲労ダメージを観察することができる．

また，サンプル未動作品のトーションバー断面の FIB 断面を SEM で観察したところ配線は約 1~2 μm 程度の結晶粒径の柱状結晶から構成されていることが分かった．また未動作品の配線中にはダメージの存在は確認されなかった．

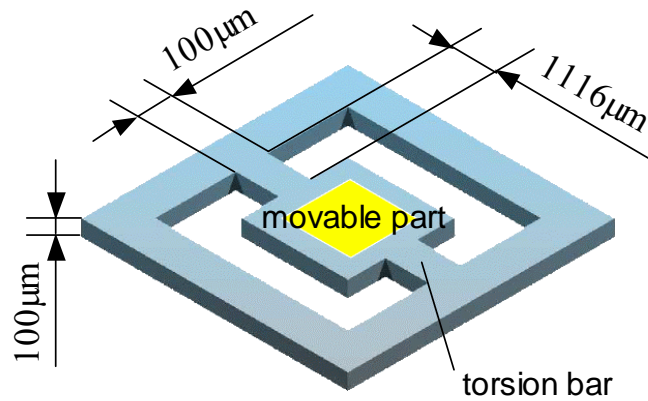


Fig. 2.1 Schematic diagram of samples used in this research

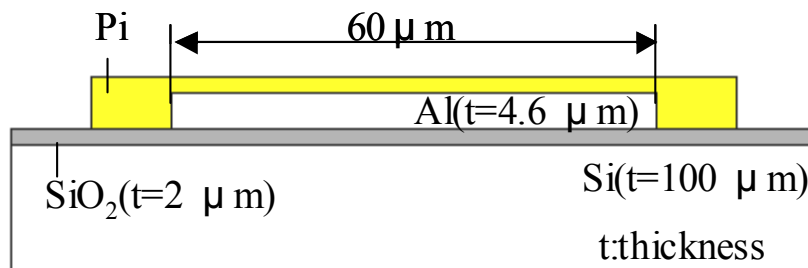


Fig. 2.2 A cross section of torsion bar (the dimension is the same as that of samples used in this research)

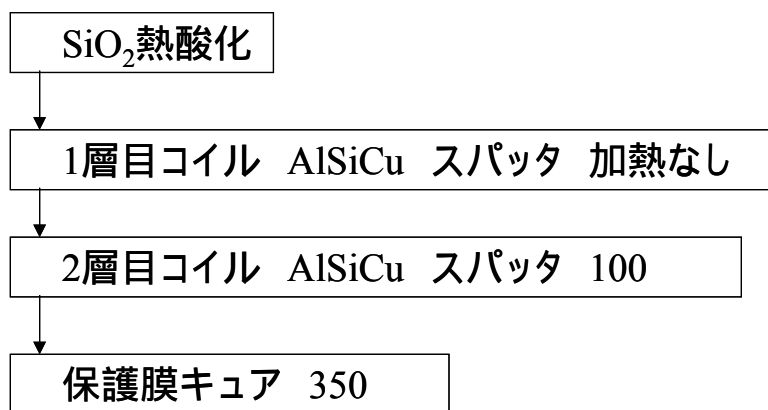


Fig. 2.3 Process flow for Al-wiring fabrication

2.2.2 実験

サンプルの連続動作に伴う配線表面のダメージ形成を調べるため, Fig. 2.4 に示す様にサンプルを専用ホルダーに固定し専用駆動回路, オシロスコープを用いて共振周波数及び電流値を調節し駆動させた. また, Fig. 2.5 に示す様に可動部に当てたレーザーの反射光を観察することで振れ角 ϕ を一定 15° に保ち動作させた. また, 観察は常温 25° で行った. 観察は適宜サンプルの動作を止め, Fig に示す(株)キーエンス製レーザー顕微鏡 VK-9510 を使用してトーションバ一部分の配線表面を観察した. レーザー顕微鏡の主な仕様は Table 2.1 に示す.

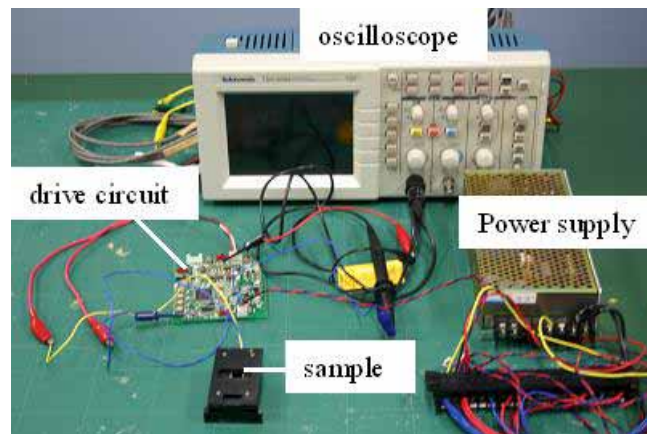


Fig. 2.4 Experimental setup

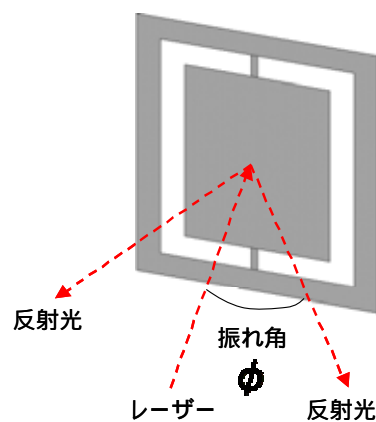


Fig. 2.5 The method to measure the angle of twist



Fig. 2.6 Laser microscope VK-9510 used in this experiment

Table 2.1 Principal specification of the laser microscope

型式	VK-9510
対物レンズ倍率	10倍, 20倍, 50倍, 150倍
観察 測定用光学系	ピンホールによる共焦点光学系
高さ測定表示分解能	0.01 μm
幅測定表示分解能	0.01 μm
光学ズーム	1倍から6倍
測定用レーザー光源	JIS クラス2 パイオレットレーザ 408nm

2.3 ねじりを受けるアルミ配線の応力分布

ねじりを受けるアルミ配線の応力分布を調べるために汎用有限要素解析ソフトANSYS11.0を用いて応力解析を行った。解析モデルをFig. 2.7に、材料定数をTable 2.2に示す。解析モデルはトーションバーをサンプル寸法でモデリングしたものである。Al, Si, SiO₂は弾性体として計算した。アルミ配線の応力解析ではAlは弾完全塑性体として扱われることが多い[6][7]が、付録Aに示す通り、サンプル動作時アルミ配線はひずみ速度が10¹オーダーの比較的高速な変形をしており、準静的な荷重負荷で行われた材料特性試験結果に比べ流動応力の上昇が予測されるため、ここでは弾性体として扱った。シリコンについては異方性の弾性定数を用いた。モデルには六面体二次要素SOLID95を用いた。バー右端は完全拘束とし図中のA部に強制変位を加えることでFig. 2.8の様にA方向、B方向に可動部が振れた状況を再現できる。

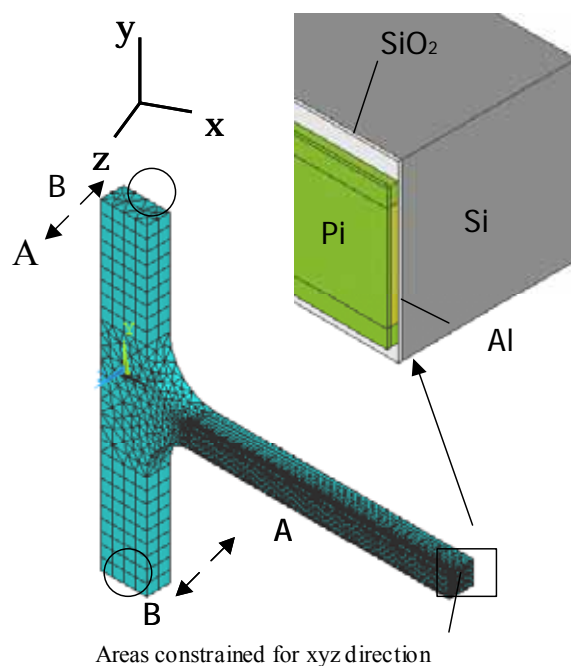


Fig. 2.7 FEM model for measuring stress distribution in Al thin film

Table 2.2 Material constants used in FEM analysis

	Young's modulus(GPa)		Poisson ratio					
SiO2	70		0.17					
Al	43.8		0.329					
Pi	3		0.499					
Si								

↓

E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{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

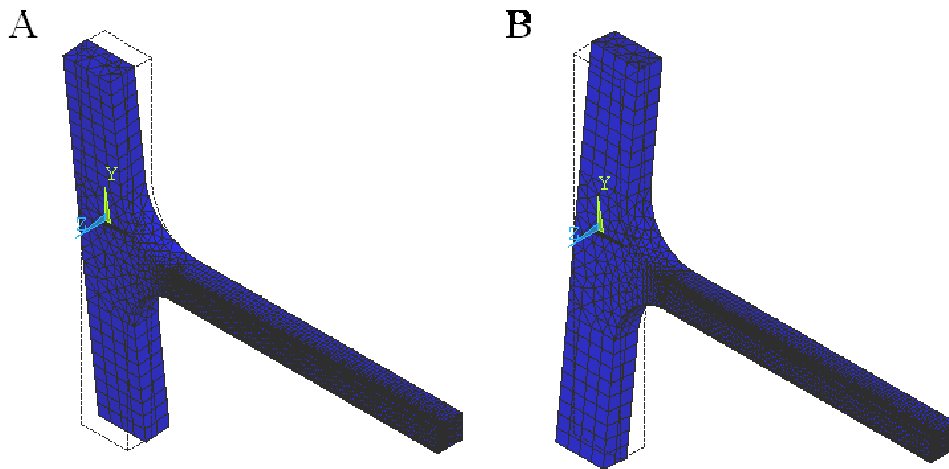


Fig. 2.8 The model deforms like this figure by forced displacement

2.4 デバイスの性能変化

観察で用いたものと同様のサンプルを用いて長時間動作させた際のサンプルの性能変化を調べるために振れ角を一定にして動作させ、共振周波数及び振れ角を一定に保つための電流値の変化を観察した。実験は Fig. 2.9 に示すようにデバイスを発振機で動作させ、レーザーの反射光で測定した振れ角を一定に保つのに必要な電流値が最小となるような交流電流周波数をサンプルの共振周波数として調べた。観察環境は Fig. 2.9 に示す様に温度については 25、65、85 の3水準、振れ角については 15°、20°、25°、31° の4水準で変化させて行った。

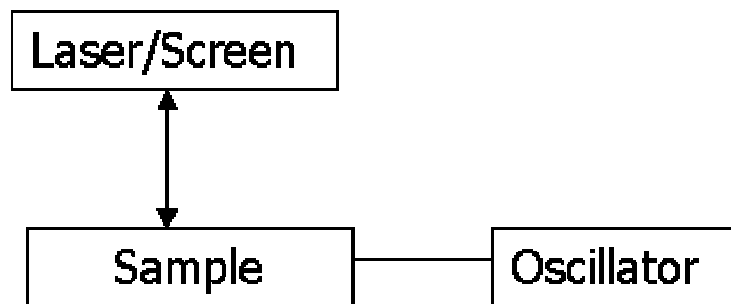


Fig. 2.9 The schematic of experimental setup

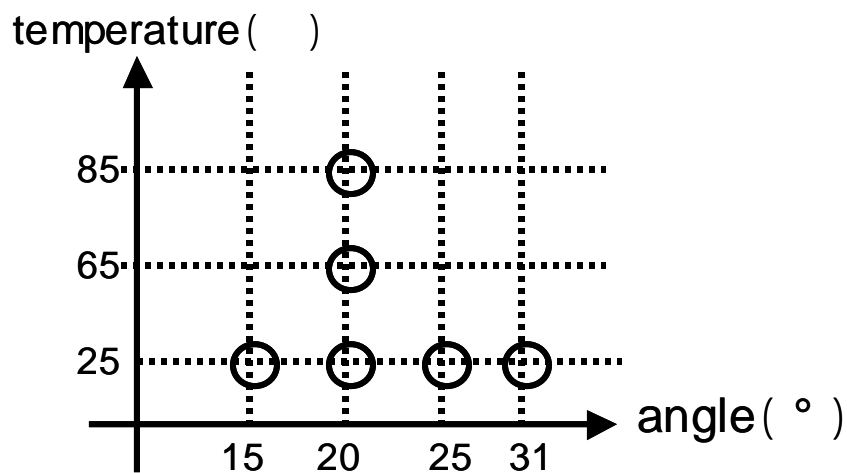


Fig. 2.10 Environmental conditions at which the experiment was done

第3章 結果

3.1 配線観察結果

まず、配線表面全体の様相の変化について述べる。Fig. 3.1 に未動作品及び動作開始後 5 時間経過(2.7×10^7 サイクル)したサンプルの配線表面全体の画像を示す。図において(a-1)、(b-1)はカラー画像、(a-2)、(b-2)は高さの差を色の濃淡で表した画像であり、図において色が薄くなるほど高いことを表す。まず、(a-1)、(b-1)を見比べると配線表面の様相に変化が起きていることがわかる。次に(a-2)、(b-2)を見比べると、配線表面中央部の色の濃淡に変化が起きていることがわかる。(a-2)にくらべ(b-2)における配線表面の色が薄くなっていることから配線表面の高さがサンプル動作後に増加していることが分かった。

次に配線に生じた変化の詳細について述べる。Fig. 3.2 は(a)から順に、未動作品、動作開始後 10 分後(7.6×10^5 サイクル)、45 分後(3.4×10^6 サイクル)、60 分後(4.6×10^6 サイクル)、120 分後(9.2×10^6 サイクル)、720 分後(5.5×10^7 サイクル)における配線表面の同箇所の拡大カラー画像を示す。まず全体の概観から動作時間が増すにつれて配線表面の高さの均一性が失われていくことがわかる。次に図中の矢印部に着目すると、配線表面の部分的な高さ変化によって生じた段差を確認できる。さらに図中の部からこの段差の変化は径 $10 \mu\text{m}$ 程度の範囲が一体となって膨れることで起きていることがわかる。配線断面の観察から配線は $1 \mu\text{m}$ 程度の結晶から構成されていることが分かっているため、結晶粒の塊が盛り上がった様な形状の膨れといえる。以上をまとめるとサンプルの動作時間の経過につれて配線表面には結晶粒の塊のような形状の膨れが発生し形成箇所はトーションバーにおけるアルミ配線全域に渡っていることが確認できた。また、高さデータから膨れの高さは $2 \mu\text{m}$ 程度である。

次に配線表面の膨れ形成による高さ変化の様子示すため、レーザー顕微鏡付属の解析ソフトVK-Analyzerを使用し配線表面全体の表面粗さを計測した。解析ソフトにおいては表面粗さを計測したい領域を指定することで、領域内の表面粗さを算出できる。JIS規格においては表面粗さは線に対して定義されたものであるが、解析ソフトではその定義を表面に拡張し面の表面粗さを算出する。本研究においては表面粗さ測定領域はトーションバー部配線表面全体とした。Fig. 3.3 に高さ方向の粗さパラメータである最大高さ R_x (付録B参照)の推移を示す。グラフから粗さパラメータは 4 時間(3.4×10^6 サイクル)程度で安定化することが分かる。よって配線表面の膨れは動作開始後 4 時間程度で進行が止まると考えられる。

また、常温での動作品のトーションバーを FIB により切断したサンプルの配線断面を SEM((株)エリオニクス製 ESM-9000)で観察したところ配線中の多数のポイドと、ポイド高密度領域に対応した表面の膨れが確認できた。

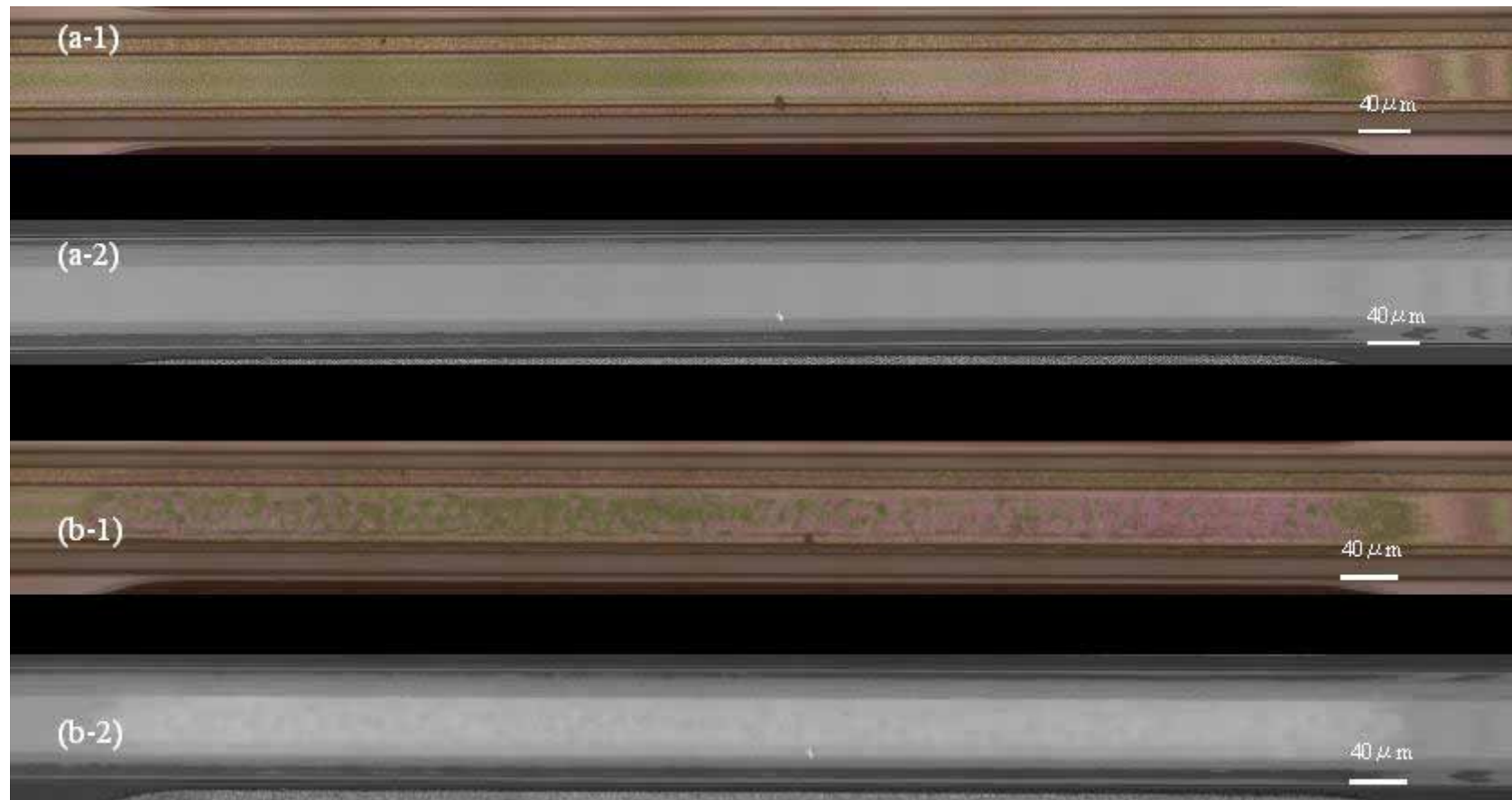


Fig. 3.1 Micrographs show the damage formation by cyclic torsional load

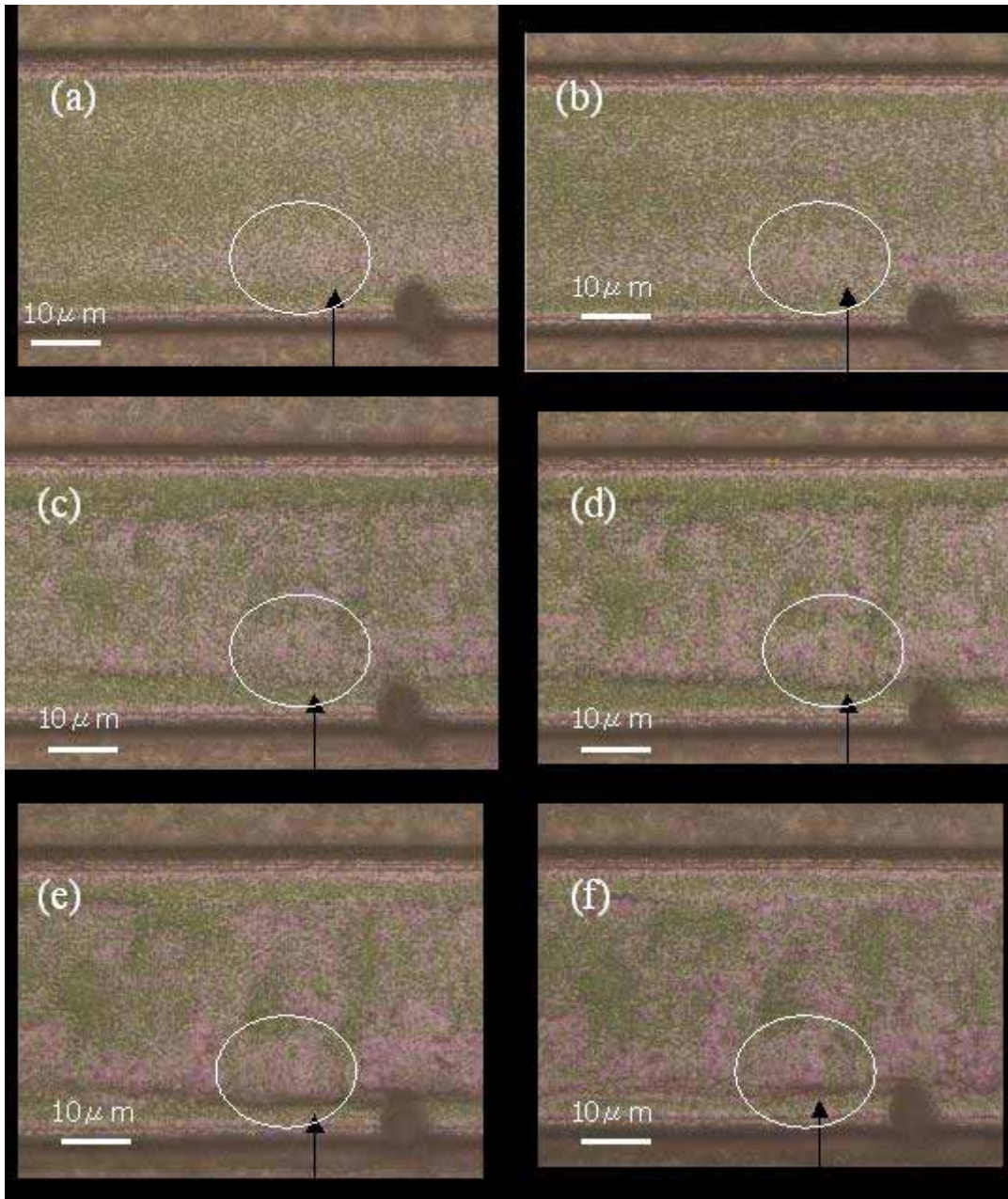


Fig. 3.2 Micrographs show the details of the surface damage

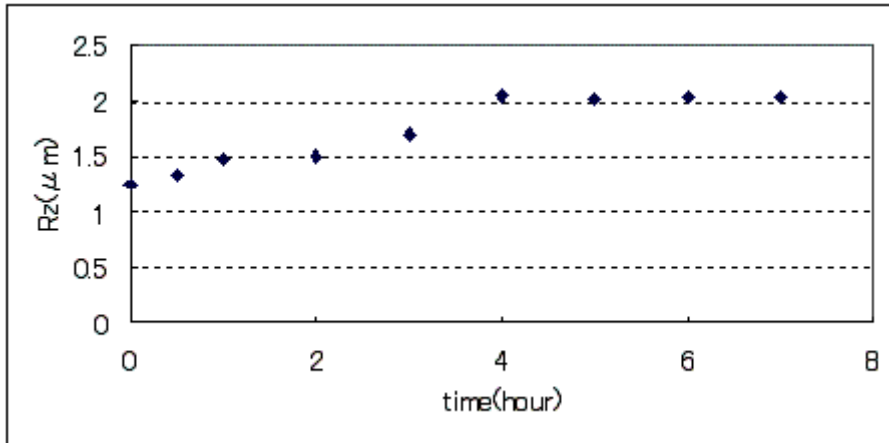


Fig. 3.3 Roughness parameter Rz vs loading time

3.2 配線の応力解析結果

アルミ配線部のA方向，B方向についてそれぞれの原形に対する変形図をFig. 3.4 に示す．断面が円形でない軸をねじるとき，軸線に垂直な断面は変形後平面でなくなりねじりによって軸方向の変位（そり）が生じる．この変形により配線中には主要な応力成分であるせん断応力 τ_{xy} が発生する．A方向，B方向に振れたときの τ_{xy} の配線表面における分布をFig. 3.5 に示す．図において，配線の左側が可動部側である．次にFig. 3.6 トーションバー中央部の，バー長手方向に垂直な断面の τ_{xy} の分布を示す．なお，この断面図において，配線の上側が表面，下側はSiO₂との界面である．コンターから，配線表面の中央部に向かうに従って τ_{xy} が大きくなっていることがわかる．また，この高せん断応力箇所は2.2において観察されたダメージ形成箇所と一致していることがわかる．一方，Fig. 3.7 に配線表面の静水圧応力の分布を示す．さらにFig. 3.8 にトーションバー中央部の，バー長手方向に垂直な断面の静水圧分布を示す．配線の向きは τ_{xy} のコンター図と同様である．コンター図から配線中には一般にボイド形成を促すとされている静水圧応力は発生していないことがわかる．尚，図における応力値の単位はMPaである．

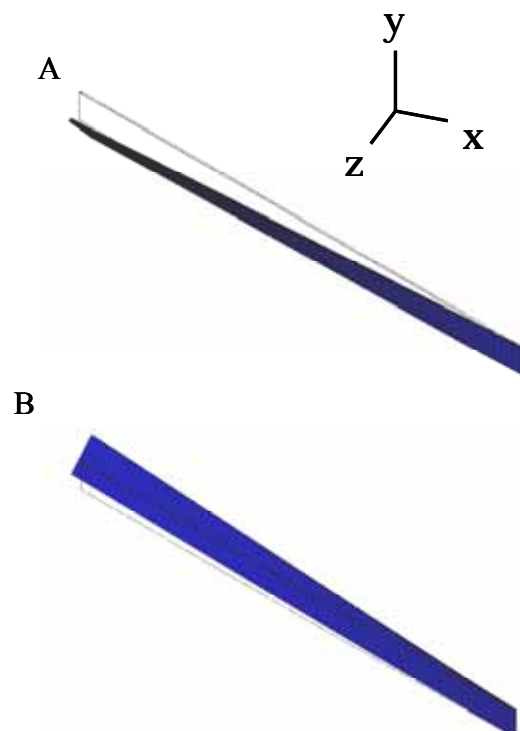


Fig. 3.4 Al thin film deforms like this figure by torsional load

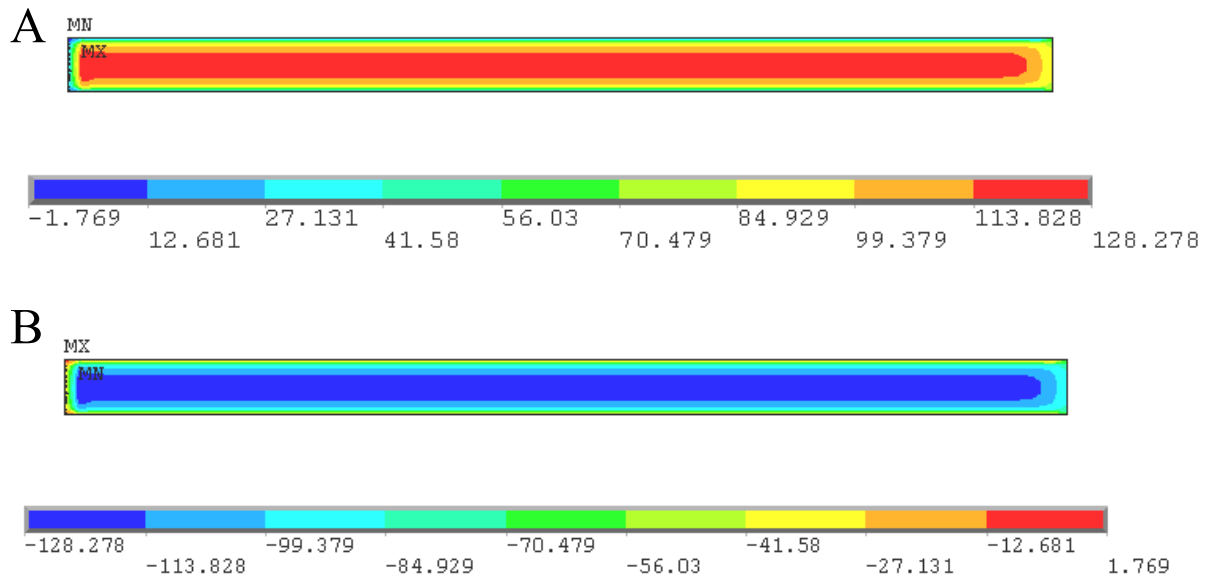


Fig. 3.5 Distribution of x_y on the film surface

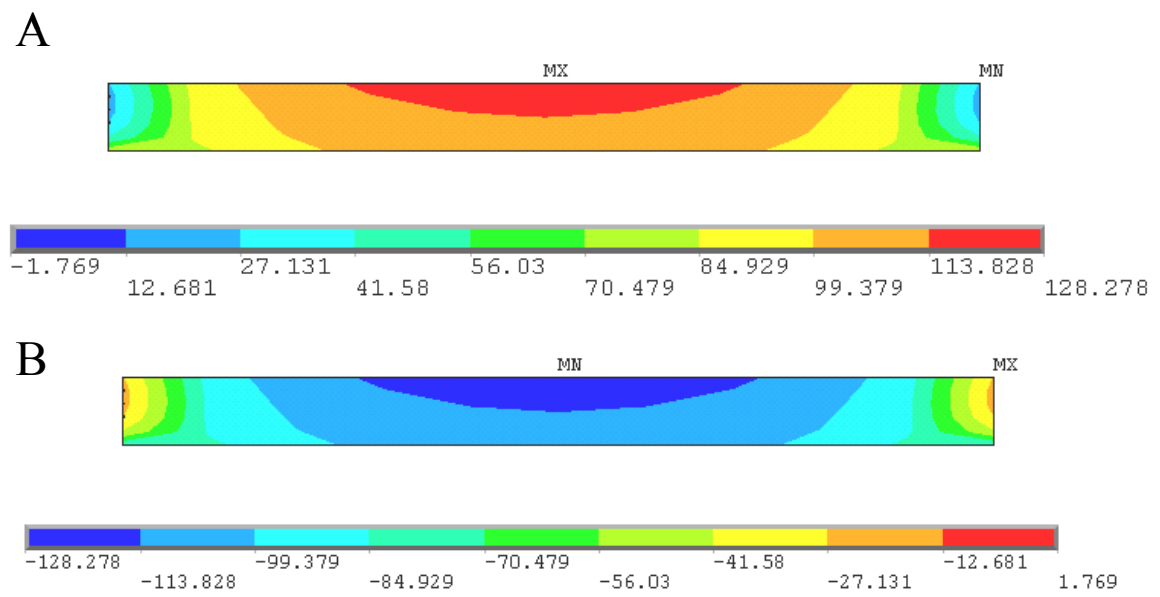


Fig. 3.6 Distribution of x_y on the cross section of the film

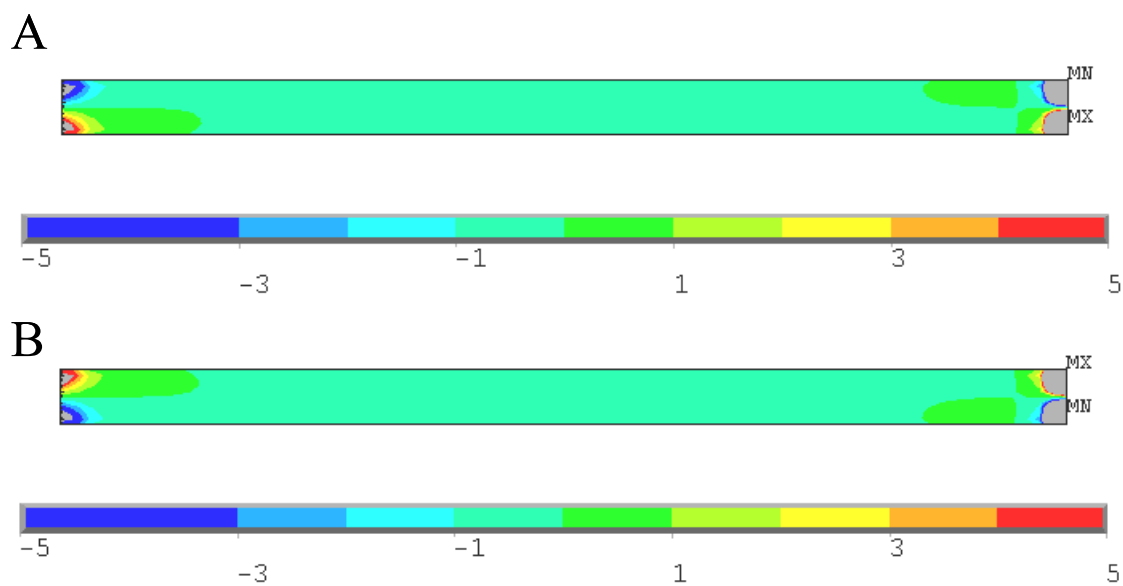


Fig. 3.7 Distribution of hydrostatic stress on the film surface

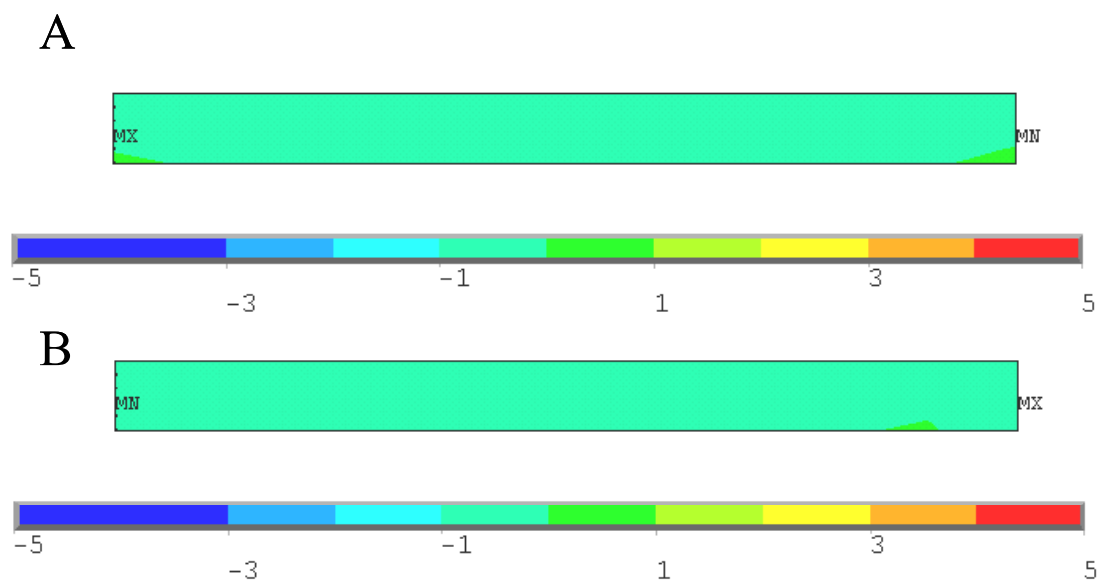


Fig. 3.8 Distribution of hydrostatic stress on the cross section of the film

3.3 デバイスの性能変化調査結果

Fig. 3.9 に常温においてサンプルを各振れ角で動作させた際の共振周波数変化率の時間推移を、Fig. 3.10 に電流値の変化率の時間推移を示す。グラフからいずれの値も数時間から数十時間のうちに減少し安定領域をむかえ、これ以降の変化は確認されていない。変動量の振れ角依存性については、振れ角 25°までは振れ角の上昇とともに周波数及び電流値の変動量の増加が見られる。しかしながら、振れ角 31°においては変動量は 25°で振ったものに比べ減少していることがわかる。

次に Fig. 3.11 に振れ角 20°においてサンプルを各温度で動作させた際の共振周波数変化率の時間推移を、Fig. 3.12 に電流値の変化率の時間推移を示す。グラフからいずれの値も減少後安定化領域を迎える。85℃においては安定化までに他の温度と比べて数十時間程度長い時間を要していることが分かる。変動量の温度依存性については 65℃、85℃における共振周波数変化率、電流値変化率は同程度の値を示し、25℃においてはこれらの温度に比べ低い変化率を示していることがわかる。

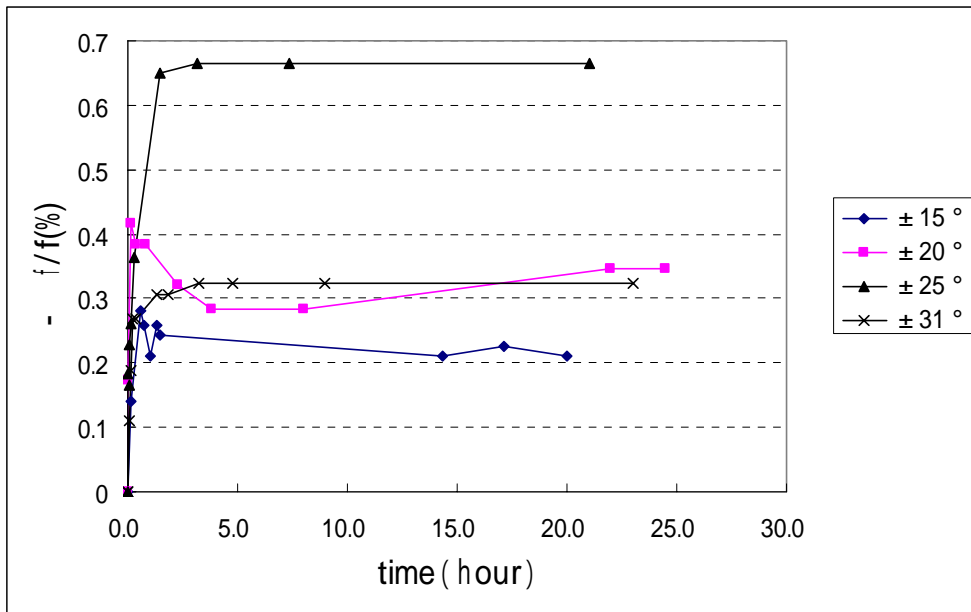


Fig. 3.9 Frequency shift vs loading time (T=25)

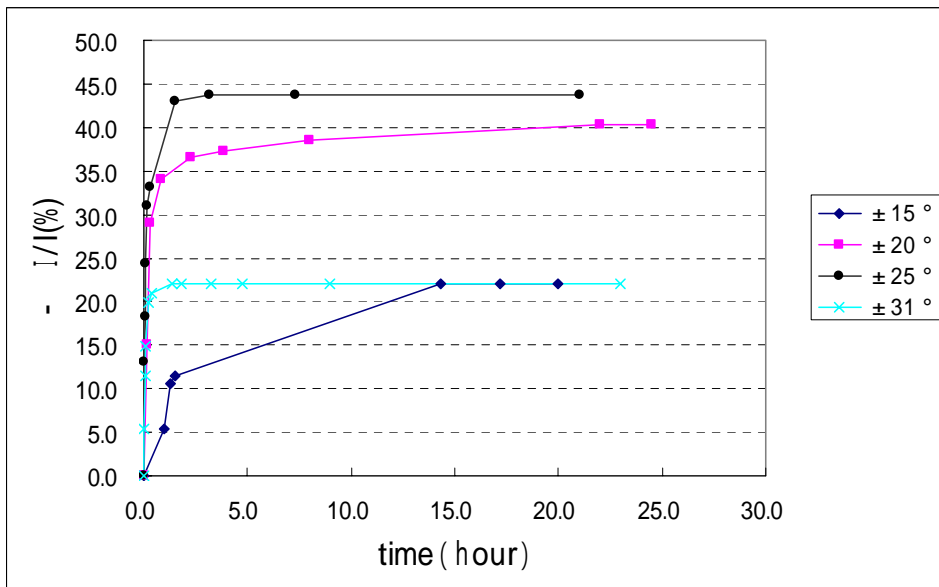


Fig. 3.10 Electric current shift vs loading time (T=25)

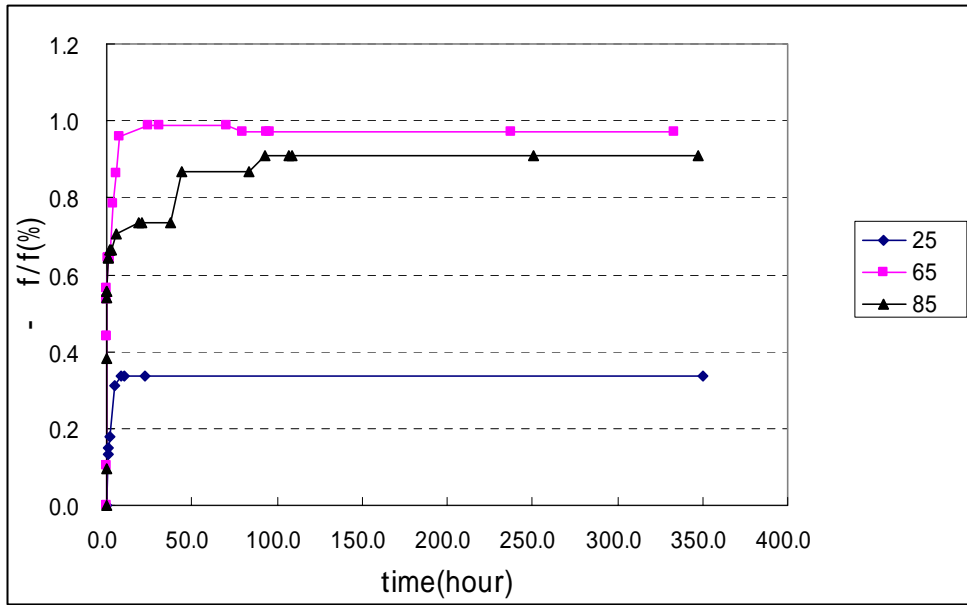


Fig. 3.11 Frequency shift vs loading time ($\theta = 20^\circ$)

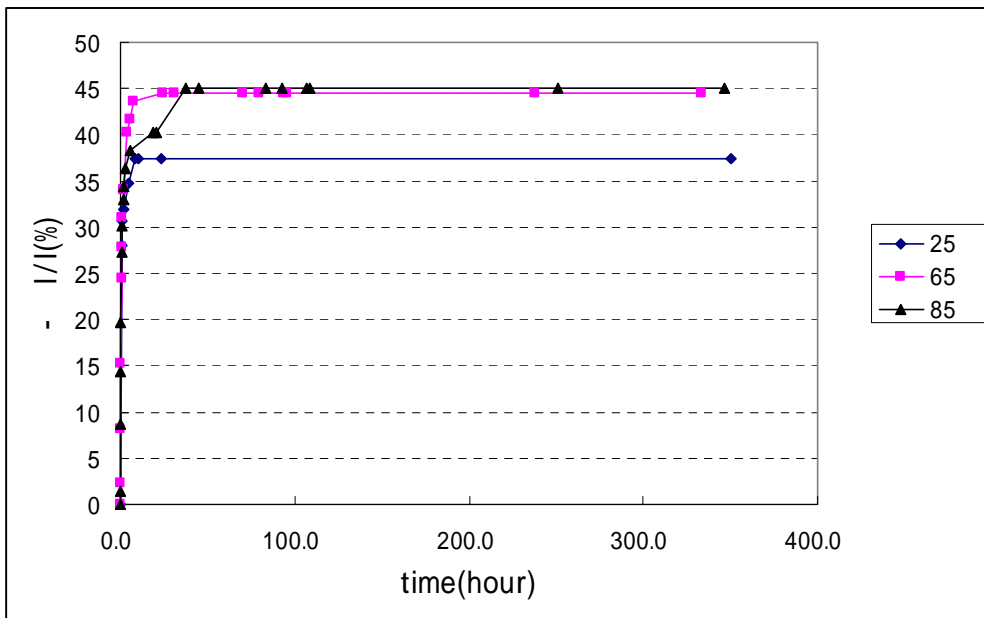


Fig. 3.12 Electric current shift vs loading time ($\theta = 20^\circ$)

第4章 考察

4.1 ダメージ形成

Fig. 3.1, Fig. 3.2 に示したトーションバー部の配線表面及び断面の疲労ダメージ観察から，本研究で用いた配線薄膜の疲労ダメージは，配線中のポイド発生と，結晶粒の塊の様な形状の膨れであることが分かった．この疲労ダメージはサンプル中の配線のうち，繰り返しねじり荷重をうけるトーションバー部のみ発生している．よって観察されたダメージは配線応力解析の結果をふまえると，ねじり荷重によって発生する周期的せん断応力の負荷によるものと考えられる．また，配線表面の膨れの形状及び，ポイドの形成はバルク材の表面に見られる疲労ダメージとは様相が異なっており，ダメージの形成には高温疲労で見られる拡散によるダメージが起こっていると考えられる．

高温疲労においては，粒界移動が起こる．この粒界移動は 粒界に転位が堆積することによる粒界の高ひずみエネルギーを減少させる方向に粒界が移動する．移動は拡散寄与の転位の上昇運動により起こり拡散機構は粒界の性質により異なる[8]．ここで，ある距離 x に関して物質がかなりの拡散を行ない再分布を示すのに要する時間 t と温度をほぼ推定するのに有用な，拡散係数を用いた式 (4.1)[9]により，粒界拡散，格子拡散が各温度で起こるタイムスケールを簡単に見積もった．拡散係数を求める際に用いた値を Table 4.1 に示す．

$$x = \sqrt{Dt} \quad (4.1)$$

結晶粒径を未動作品の断面観察の結果から $1\mu\text{m}$ とし 25 ， 65 ， 85 において拡散時間を求めた結果を Table 4.2 に示す 現象のタイムスケールと比べると，本研究における試験環境においては粒界拡散のタイムスケールに近いことが分かる．

Table 4.1 Material constants used to estimate diffusion coefficient

Material property	Value
Grain-boundary diffusion pre-exponential D_{gb}^0	$2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [10]
Activation energy for boundary diffusion Q_{gb}	60 kJ/mol [10]
Lattice diffusion pre-exponential D_{vol}^0	$1.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ [11]
Activation energy for lattice diffusion Q_{vol}	142 kJ/mol [11]

Table 4.2 Estimated diffusion time

	25	65	85
Grain boundary diffusion time(s)	$1.8 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^2$
Lattice diffusion time(s)	$5.6 \cdot 10^{16}$	$6.2 \cdot 10^{13}$	$3.6 \cdot 10^{12}$

4.2 共振周波数変化の検証

4.2.1 FEM 固有振動数解析

3章において、トーシヨンバー部配線のダメージ進行と共振周波数の変化はほぼ同時間で進行し安定化することが示された。このことから、配線ダメージがサンプルの共振周波数に影響を与えていることが推測される。

周期ねじり荷重を受けるアルミ配線の疲労ダメージとして確認されたのは、高せん断応力域に形成されたポイド、ポイド高密度箇所に対応した配線表面の膨れである。ポイドの形成によるヤング率の低下に関しては数多くの報告がある[12][13][14]。また、振れ角を一定に保つための電流値の変化が共振周波数変化と同様の变化傾向を示したことからダメージ進行に伴う配線の剛性低下が推測される。これ以外にも配線中の質量の再分布（但し、配線全体の質量は保存される）、膨れの形成によるトーシヨンバーの断面形状の変化に起因するねじり剛性の変化が起こることが推測される。本項では FEM 解析を用いて、配線剛性、密度、形状変化がサンプルの共振周波数に与える影響についての調査結果を示す。

解析には汎用有限要素解析ソフトANSYS11.0の固有振動数解析を用いた。解析モデルをFig. 4.1に、材料定数をTable 4.3に示す。モデルは可動部、トーシヨンバーを模擬したものである。モデル形状はサンプル寸法に従った。可動部は左右対称であるため、対象境界条件を用いてモデルを簡略化した。また、トーシヨンバーの端部を完全拘束とした。実際のサンプルの動作を再現するため、可動部の各角部にトーシヨンバーをはさんだ上下で位相が逆となるように荷重を設定した。固有振動数解析においては各部材Al, Si, SiO₂は弾性体として計算される。Siについては異方性の弾性定数を用いた。また、固有振動数解析を行うにあたり、各部材について密度を設定した。モデルには六面体二次要素SOLID42を用いた。

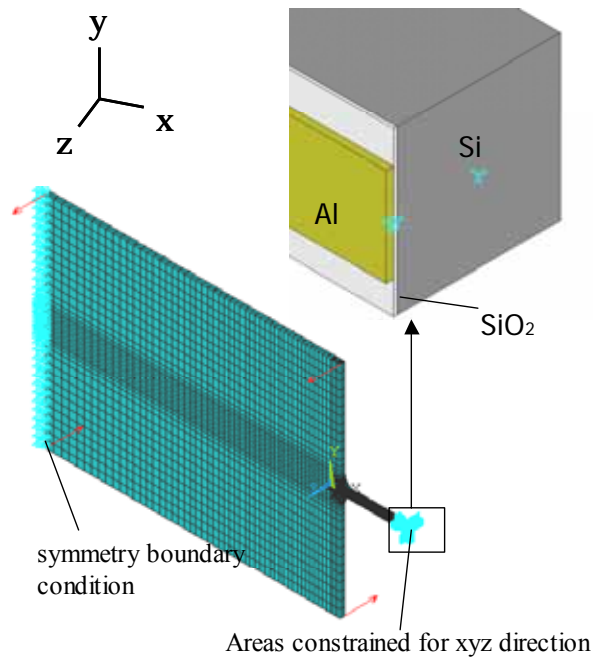


Fig. 4.1 FEM model for eigenfrequency analysis

Table 4.3 Material constants used in eigenfrequency analysis

	Young's modulus(GPa)		Poisson ratio			density(kg/m ³)		
SiO ₂	70		0.17			2650		
Al	43.8		0.329			2700		
Si						2330		
E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{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

4.2.2 解析結果

まず、配線部の剛性と密度が変化した場合の共振周波数へ与える影響を調べた結果を Fig. 4.2 に示す。解析は AI のヤング率、密度をそれぞれ変化させて行った。解析結果から、密度の変化が周波数に与える影響に比べ、ヤング率の変化が周波数に与える影響の変化が大きかった。密度の影響が小さいのは、構造全体の質量に対し、トーシヨンバー部の配線の質量が小さいことによると考えられる。実際には配線の質量は保存される。しかしながら、ボイドの形成により配線中の質量分布には変化が起こる。Fig. 4.2 の結果からこの影響も非常に少ないものと考えられる。

次に、配線の膨れによる形状変化が共振周波数に与える影響を調べた結果を Fig. 4.3 に示す。解析は AI の厚さを実際観察されている膨れの高さの範囲で変化させて行った。また配線の質量が一定となるように配線の密度を調節した。解析結果から配線の膨れはサンプルの共振周波数を上昇させることが分かった。これは、トーシヨンバーの断面二次モーメントの増加によるねじり剛性の増加のためと考えられる。実際観察される膨れは、モデルのように、一様かつ配線表面全面に渡って連続して発生しているわけではない。従って、実際の膨れが共振周波数に与える影響は解析結果に比べ小さくなると考えられる。また、実際の共振周波数変化は低下の傾向を示しているため、ダメージによる配線の変化のうち共振周波数に最も影響を与えるのは剛性の変化であると考えられる。

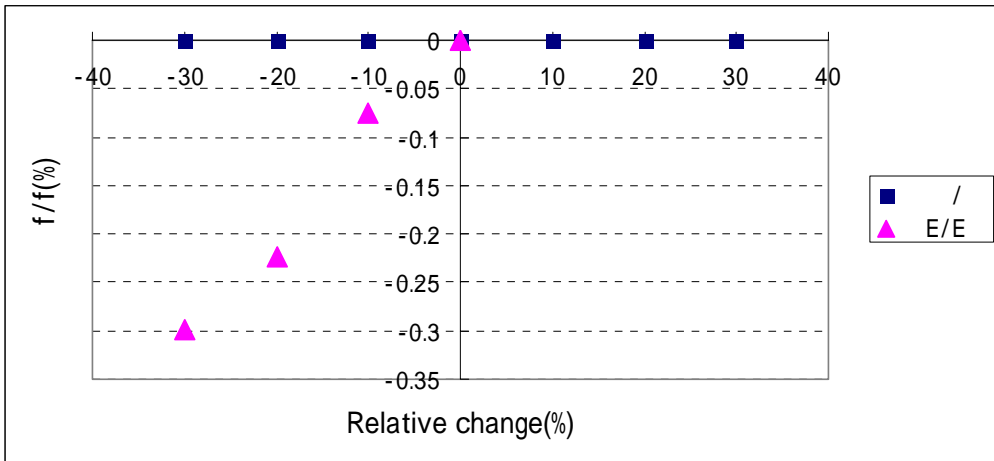


Fig. 4.2 Relative eigenfrequency shift due to the change of the density and the Young's modulus

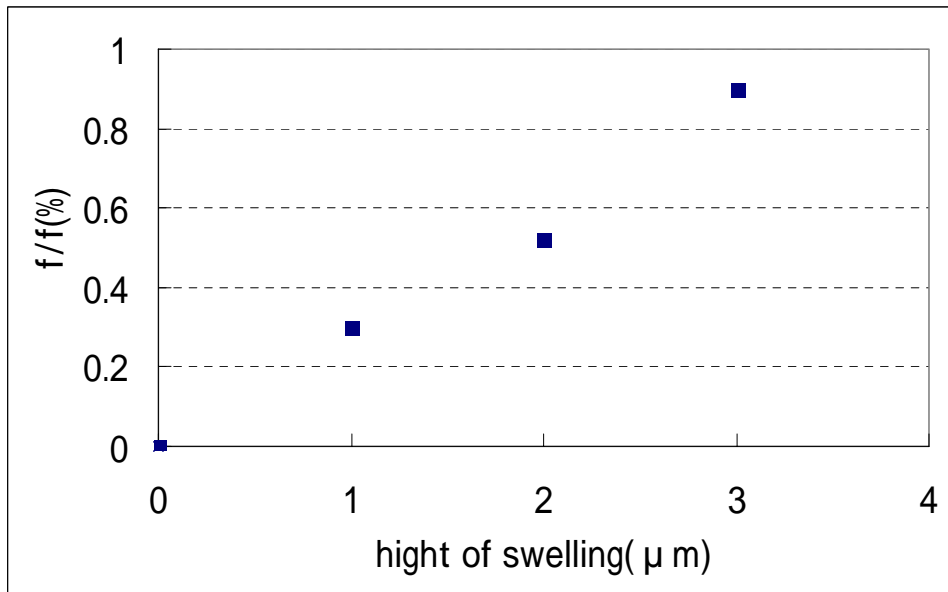


Fig. 4.3 Relative eigenfrequency shift due to the change of film thickness

4.2.3 ボイド率と弾性係数の関係

実際観察されているダメージがどの程度剛性に影響を及ぼすかを調べるためにボイド率と弾性係数の関係を示す Phani らの式(4.2)[13]を用いた。この式は、広範囲のボイド率において、ボイド率と有効弾性係数の関係をよく表すとされている[15]。

$$E = E_0 \left(1 - \frac{P}{p_c} \right)^f \quad (4.2)$$

式においてE:有効弾性係数 p:ボイド率 E_0 :弾性係数 p_c :Eが0になるときのボイド率 f: ボイドの形状, サイズ, 分布に依存する指数, である。式において $p_c=1$ としてボイド率とヤング率の関係を整理することが多い。

観察で用いたレーザー顕微鏡付属の解析ソフト VK-Analyzer を用いると、撮影した画像上で領域指定をした後、その領域内の高さの上限と下限を指定することでその閉領域中の物体の体積を測定できる。本研究で撮影した配線表面画像を利用すると、高さの下限を配線の最下部、上限を膨れの頂上とし、トーションバー部配線を領域指定すればトーションバー部の配線全体の体積を、高さの下限を配線表面とし上限を膨れの頂上とすれば膨れの体積を測定できる。膨れの進行が安定化した後に膨れの体積及び配線全体の体積を測定した結果配線表面の膨れの体積は $17835 \mu\text{m}^3$ 、配線全体の体積は $227630 \mu\text{m}^3$ と見積もれた。配線の質量は保存されるので膨れ発生後の配線密度の変化率は体積の変化から 0.92 程度、よってボイド率は 0.08 程度と見積もれる。このボイド率を式に代入し、 $f=3$ 程度とすると、Fig. 4.2 から同環境で測定された共振周波数変化に対応するヤング率変化(22%低下)となる。ここで、Phani [13]によれば、球状の場合 2 程度。アスペクト比の高い、ボイドの場合はさらに大きな 3~4 程度の値をとるとされている。実際に観察されたボイドは球状ではなく、アスペクト比の高いものであることが分かっているので、式(4.2)を使うと形成されたボイドが共振周波数を変化させるといえる。

しかしながら、式はバルク材に対してのものである。薄膜は薄膜自身より剛性の高い基板に付着しており、その基板が基板周辺のボイドによる剛性低下を和らげる可能性が考えられる。また、配線堆積過程により発生する配線薄膜の残留応力がボイド形成により緩和され、シリコン基板を变形させる可能性も考えられ、このことも共振周波数に影響を与えるのではないかと推測される。

4.3 安定化のメカニズム

本研究で観察された現象は数時間で進行，その後安定化する．これは，数時間で配線中の組織変化が起こらなくなったことを意味している．

秋田，馬場ら[16][17]は本研究で用いたサンプルと類似の周期ねじり荷重を受けるアルミ配線薄膜において，動作開始後 1 時間で薄膜を構成する結晶粒のサブグレイン化が起こることを細束放射光の回折像を観察することで確認している．

一方，サブグレインの形成が材料の降伏強度を上昇させるという報告は古くからあり[18]，サブグレインの形成による材料の強化が行われている．D.Kalishら[19]はアルミ配線形成過程に成長するサブグレインのサイズと降伏強度の関係が，サブグレインのサイズが $0.4\ \mu\text{m} \sim 1.5\ \mu\text{m}$ の間において hall-petch の式に従い，サブグレインサイズの低下とともに降伏強度が上昇することを示している．また，鉄系材料においても，ナノスケールから数ミクロンの範囲においてサブグレインサイズの低下とともに降伏強度が上昇することが観察されている[20]．

このことから，配線中のアルミニウム結晶がサブグレイン化することでアルミの降伏強度が上昇，弾性的に振舞うようになったため，転位起因の疲労メカニズムが抑制されることで現象の安定化が起こったと推測できる．

第5章 結論

本研究においては、周期ねじり荷重を受ける配線薄膜を構造中にもつ、共振駆動の MEMS 実機を模擬したサンプルを用いて、この荷重形態、配線寸法におけるアルミ配線の疲労現象を観察した。また、疲労現象の進行に伴い発生するサンプルの性能変化を計測し配線ダメージとの関連について検証した。

本研究で得られた結論を以下の様に要約する。

- ・ 本研究で用いたサンプル中の周期ねじり荷重を受ける MEMS アルミ配線薄膜には、常温で拡散による膨れ・ポイドが数時間で形成され、ダメージ形成は数時間で安定化することが分かった。
- ・ 連続動作によってサンプルの共振周波数、振れ角を一定に保つのに必要な電流値は動作開始とともに減少し、ダメージ形成の安定化と同程度の時間で安定化することが分かった。
- ・ 疲労ダメージが共振周波数変化に与える影響について検証を行ないダメージによる配線の剛性変化が最も共振周波数に影響を与えることを示した。また、バルク材におけるヤング率とポイド率の関係式を用い実際のダメージが剛性に与える影響を調べたところ、観察されているダメージで、サンプルの共振周波数を変化させうる程度の剛性変化がおこることがわかった。

付録 A トーションバーのひずみ速度

アルミ配線薄膜の応力解析を行う際，アルミは弾完全塑性体として扱われることが多い．しかし，本研究で用いたサンプルは 1270Hz で駆動するため，ひずみ速度が大きくなり，準静的な材料試験で得られた応力-ひずみ曲線の結果をそのままあてはめるのは不適切な可能性がある．そこで，トーションバーを同スケールの丸棒に置き換えひずみ速度の概算を行った．Fig. A.1 に丸棒の概略図を示す．

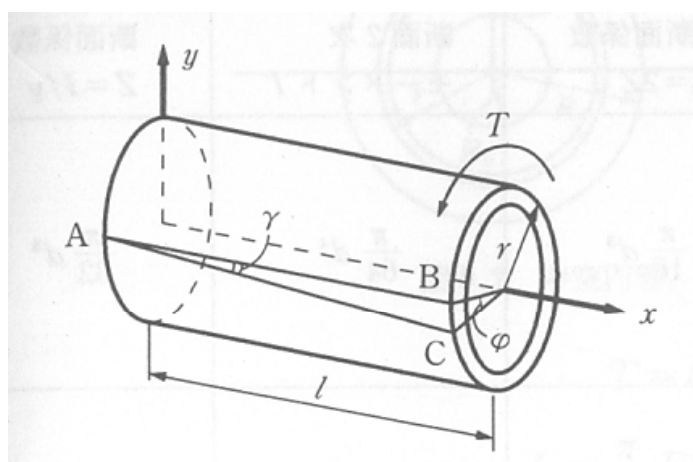


Fig. A.1 Torsionally loaded cylindrical rod

図において， γ :ねじれ角， ϕ :せん断歪， r :半径， l :長さ， T :トルク，を表す． 15° トーションバーをねじった状況を再現するため， $l=1116(\mu\text{m})$ ， $r=50(\mu\text{m})$ ， $\phi=0.2618(\text{rad})$ ，とする． 15° 傾けるまでの所要時間 t は以下のように求められる．

$$t = \frac{1}{4 \times f} = 0.25 \times 10^{-3} \quad (\text{A.1})$$

また，

$$\gamma = \frac{r\phi}{l} = \frac{50 \times 0.2618}{1116} = 1.1 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A.2})$$

よって，ひずみ速度は，

$$\dot{\gamma} = \frac{\gamma}{t} = \frac{r\phi}{l} / t = 4.4 \cdot 10^1 \quad (\text{A.3})$$

と求められ，準静的過程に比べ高速で動作していることが分かる．高速変形においては，流動応力は上昇する．よって本研究におけるアルミ配線の応力解析においては，アルミを弾性体として計算した．

付録 B 粗さ解析

本研究において、配線の膨れの高さ評価するために表面粗さの概念を導入する。本研究で使用した解析機器の性能上、計測長を十分に確保できないため JIS[18]に規定されているカットオフ波長と評価長さの関係を無視して計測線の設定に従ってのみ計算する。その部分を除いて、曲線・パラメータの計算方法は JIS 規格に準じている。以下、粗さに関する各用語を記す。

断面曲線 (primary profile):

測定断面曲線にカットオフ値 λ_c の低域フィルタを適用して得られる曲線

粗さ曲線 (roughness profile):

カットオフ値 λ_c の高域フィルタによって、断面曲線から長波長成分を遮断して得た輪郭曲線

うねり曲線 (waviness profile):

断面曲線にカットオフ値 λ_f および λ_c の輪郭曲線フィルタを順次かけることによって得られる輪郭曲線。

位相補償フィルタのカットオフ値 (cutt-off wavelength of the phase correct filter):

輪郭曲線フィルタによって、振幅の 50% が伝達される制限は信号の波長

評価長さ (evaluation length): 輪郭曲線の軸方向長さ

高さプロファイルのデータに以下の関数で示されるガウシアンフィルタを適用してうねり曲線を求める。また、求めたうねり曲線から粗さ曲線を求める。

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_{co}} e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_{co}} \right)^2} \quad (\text{B.1})$$

ここに、

x : 重み関数の中央からの位置

λ_{co} : 輪郭曲線フィルタのカットオフ値

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0.4697 \quad (\text{B.2})$$

である。

本研究で用いた粗さ特性値は最大高さ R_z で、粗さ曲線において、最も高い山の高さ R_p と最も深い谷の深さ R_v の和として以下のFig. B.1のようによろに定義される。表面粗さのカットオフ値は $s=2.5\mu\text{m}$, $c=0.08\text{mm}$, $f=0.8\text{mm}$ として算出した。表面粗さの値はカットオフ値の定義で変わってくる。しかし、粗さの相対的な比較においては同一のカットオフ値を用いることで問題はない。

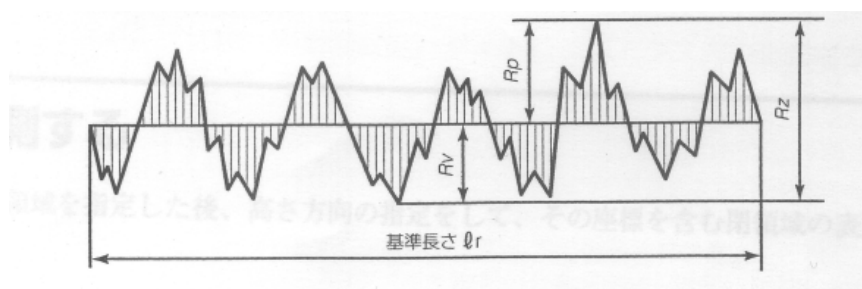


Fig. B.1 Definition of R_z

付録 C 共振周波数・電流値変化データ

本章には Fig. 3.9 , Fig. 3.10 , Fig. 3.11 , Fig. 3.12 にしめした , 動作環境を変化させた際のサンプルの共振周波数 , 電流値の変化の生データ及び , 共振周波数 , 電流値の動作開始後最初の 3 時間の推移をまとめたグラフを示す .

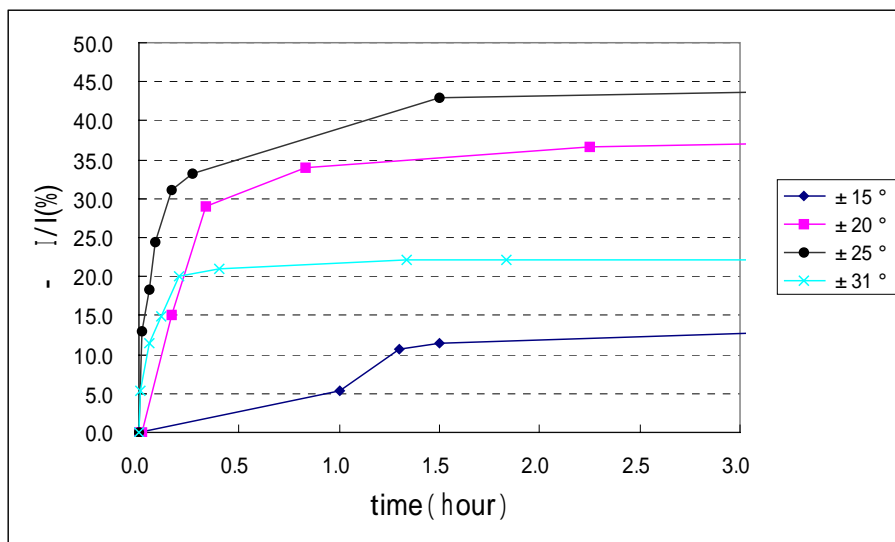


Fig.C.1 Frequency shift vs loading time(first 3 hours) (T=25)

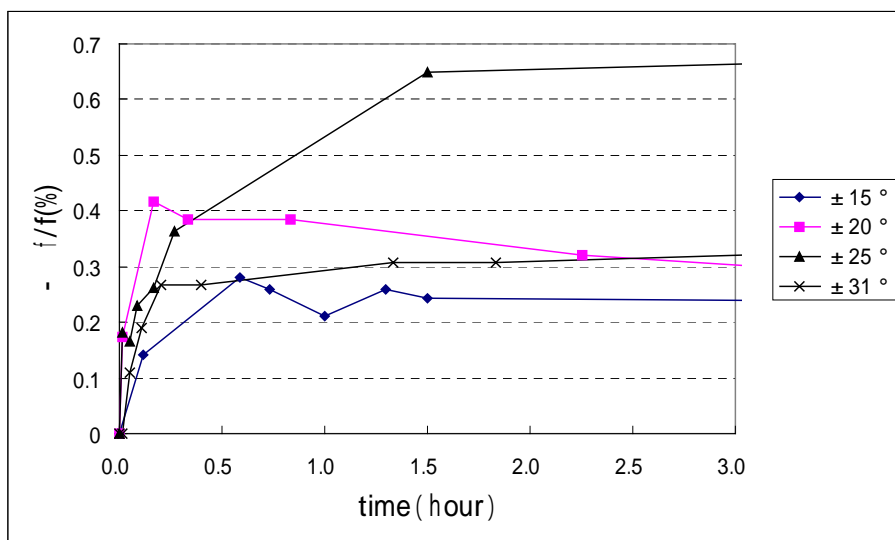


Fig.C.2 Electric current shift vs loading time(first 3 hours) (T=25)

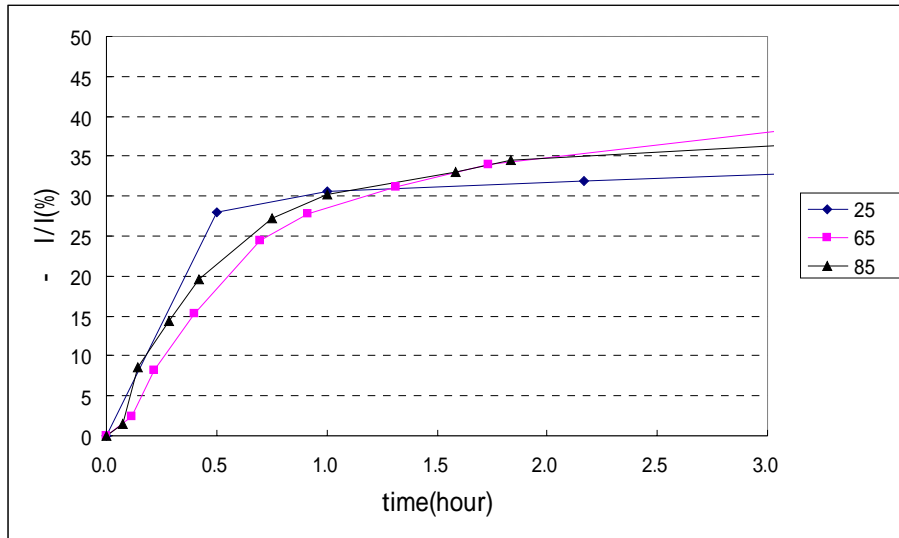


Fig.C.3 Frequency shift vs loading time(first 3 hours) ($\theta = 20^\circ$)

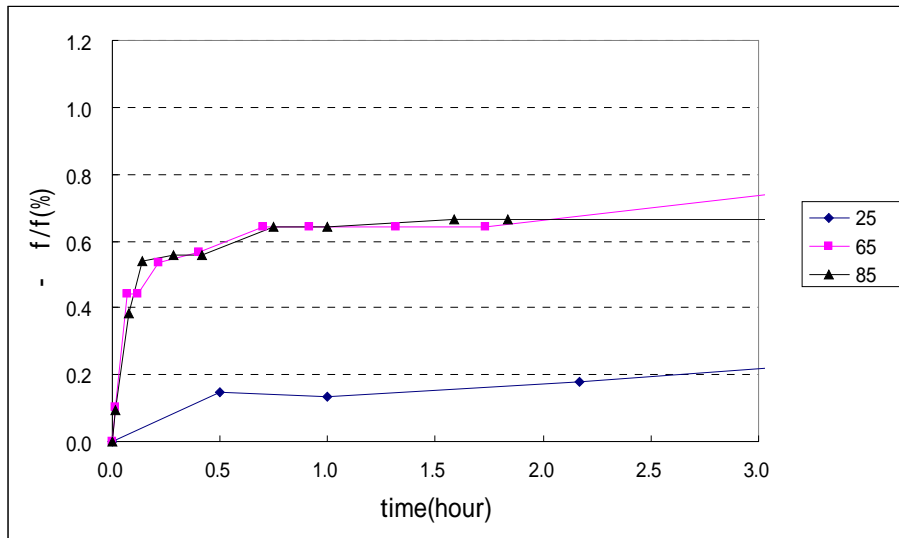


Fig.C.4 Electric current shift vs loading time(first 3 hours) ($\theta = 20^\circ$)

Table C.1 Frequency and electric current shift (15 ° 25)

ID: 1611 ± 15deg 25		
time(hour)	f(Hz)	I(mA)
0.0	1277.6	11.3
0.1	1275.8	13.2
0.6	1274	12.2
0.7	1274.3	11.4
1.0	1274.9	10.7
1.3	1274.3	10.1
1.5	1274.5	10.0
14.3	1274.9	8.8
17.2	1274.7	8.8
20.0	1274.9	8.8

Table C.2 Frequency and electric current shift (20 ° 25)

ID: 1627 ± 20deg 25		
t(hour)	f(Hz)	I(mA)
0	1275.3	26.3
0.016667	1273.1	26.3
0.166667	1270	22.3
0.333333	1270.4	18.6
0.833333	1270.4	17.3
2.25	1271.2	16.6
3.833333	1271.7	16.4
8	1271.7	16.1
22	1270.9	15.6
24.5	1270.9	15.6

Table C.3 Frequency and electric current shift (25 ° 25)

ID: 1630 ± 25deg 25		
time(hour)	f(Hz)	I(mA)
0	1264.2	36.1
0.016667	1261.9	31.4
0.05	1262.1	29.5
0.083333	1261.3	27.3
0.166667	1260.9	24.9
0.266667	1259.6	24.1
1.5	1256	20.6
3.166667	1255.8	20.3
7.333333	1255.8	20.3
21	1255.8	20.3

Table C.4 Frequency and electric current shift (31 ° 25)

ID: 1629 ± 31deg 25		
time(hour)	f(Hz)	I(mA)
0	1271.3	37.6
0.011111	1271.3	35.6
0.05	1269.9	33.3
0.111111	1268.9	32
0.2	1267.9	30.1
0.4	1267.9	29.7
1.333333	1267.4	29.3
1.833333	1267.4	29.3
3.25	1267.2	29.3
4.75	1267.2	29.3
9	1267.2	29.3
23	1267.2	29.3

Table C.5 Frequency and electric current shift (20 ° 65)

ID: 1623		± 20deg	65
time(hour)	f(Hz)	I(mA)	
0	1274	20.9	
0.0166667	1272.7	23.1	
0.0666667	1268.4	21.5	
0.1166667	1268.4	20.4	
0.2166667	1267.2	19.2	
0.4	1266.8	17.7	
0.7	1265.8	15.8	
0.9166667	1265.8	15.1	
1.3166667	1265.8	14.4	
1.7333333	1265.8	13.8	
3.6666667	1264	12.5	
5.75	1263	12.2	
7.25	1261.8	11.8	
24.25	1261.4	11.6	
31.25	1261.4	11.6	
70.25	1261.4	11.6	
79.75	1261.6	11.6	
93.75	1261.6	11.6	
95.75	1261.6	11.6	
237.75	1261.6	11.6	
333.75	1261.6	11.6	

Table C.6 Frequency and electric current shift (20 ° 85)

ID: 1632 ± 20deg 85		
time(hour)	f(Hz)	I(mA)
0	1276.9	20.9
0.0166667	1275.7	22.6
0.075	1272	20.6
0.1416667	1270	19.1
0.2833333	1269.8	17.9
0.4166667	1269.8	16.8
0.75	1268.7	15.2
1	1268.7	14.6
1.5833333	1268.4	14
1.8333333	1268.4	13.7
3.0833333	1268.4	13.3
6	1267.9	12.9
19	1267.5	12.5
20.5	1267.5	12.5
37.5	1267.5	11.5
44.5	1265.8	11.5
83.5	1265.8	11.5
93	1265.3	11.5
107	1265.3	11.5
109	1265.3	11.5
251	1265.3	11.5
347	1265.3	11.5

参考文献

- [1]前田龍太郎，池原毅，小林健，単学伝，“MEMSのおはなし”，日刊工業新聞社，2005，pp．66-68
- [2]E．Arzt，“Size effects in materials due to microstructural and dimensional constraints:a comparative review”，*Acta Mat*，46，1998，pp．5611-5626
- [3]G．P．Zhang，C．A．Volkert，R．Schwaiger，R．Mönig and O．Kraft，“Fatigue and thermal fatigue damage analysis of thin metal films”，*Microelectronics Reliability*，47，2007，p．p．2007-2013
- [4]G．P．Zhang，C．A．Volkert，R．Schwaiger，P．Wellner，E．Arzt，O．Kraft”Length-scale-controlled fatigue mechanism in thin copper films”，*Acta mater*，54，2006，pp．3127-3139
- [5]C．Eberl，“Fatigue of Al thin films at ultra high frequencies”，Ph．D thesis，university of Stuttgart，Germany，2005
- [6]Anne．I．Sauter，William．D．Nix，“Thermal stresses in aluminum lines bonded to substrates”，*IEEE Transaction on components，hybrids and manufacturing technology*，15，1992，pp．594-600
- [7]L．T．Chi，K．N．Tu，“Finite element analysis of failure mechanism in a multilevel metallization structure”，*J．Appl．Phys．*，77，1995，pp．3037-3041
- [8]M．Winning，G．Gottstein，L．S．Shvindlerman，“On the mechanism of grain boundary migration”，*Acta materia*，50，2002，pp．353-363
- [9]C．R．バレット，W．D．ニックス，A．S．テテルマン著，井形直弘，堂山昌男，岡村弘之訳，“材料科学1”，培風館，1979，pp．162-163
- [10]Landolt-Börnstein，“Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology”，*Springer-Verlag*，26，1990，pp．640

- [11]M . F . Ashby , D . R . H . Jones , "Engineering Materials 1" , Elsevier , 2005 , pp . 293
- [12]J . C . Wang , "Young's modulus of porous materials" , J . Mater . Sci , 19 , 1984 , 801-808
- [13]K . K . Phani , S . K . Niyogi , "Young's modulus of porous brittle solids" , J . Mater . Sci , 22 , 1987 , 257-263
- [14]N .Ramakrishman ,V .S .Arunachalam , "Effective elastic moduli of porous solids" , J . Mater . Sci , 25 , 1990 , 3930-3937
- [15]J . Kovacik , "Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials" , J . Mater . Sci . lett , 18 , 1999 , pp . 1007-1010
- [16]秋田貢一 , 杉崎大修 , 大谷眞一 , 萩原芳彦 , 上田譲 , "MEMS内アルミニウム配線の疲労特性" 機械材料・材料加工技術講演会講演論文集 ,2003 ,pp .199-200
- [17]馬場重亨 , 秋田貢一 , 大谷眞一 , 上田譲 , 河村真 , "細束放射光回折によるアルミニウム薄膜配線の疲労損傷評価" , X 線シンポジウム講演論文
- [18]A . W . Thompson , "Substructure strengthening mechanism" , Metallurgical Transactions A , 8A , 1977 , 833-841
- [19]D . Kalish , B . G . LeFEVRE , "Subgrain strengthening of aluminium conductor wires" , Metallurgical Transactions A , 6A , 1975 , 1319-1324
- [20] D . R . Lesuer , C . K . Syn , O . D . Sherby , "Nano-subgrain strengthening in ball-milled iron" . Material Science and Engineering A , 463 , 2007 , 54-60
- [21] JIS B0601 , B0632 , B0633

以上

p.1 ~ 53 完

修士論文

平成 20 年 2 月 8 日提出

66202 久保寺 裕典