

第4章

試作アクチュエータの 線形性の評価

4.1 実験の目的

本章では、第2章で試作した積層アクチュエータの変位-電圧特性をレーザ干渉計を用いて測定し、その線形性とヒステリシスの有無を評価した。また、FFTによって動作周波数に対する高調波成分を調べることによっても線形性を評価した。更に、変位や位相遅れの周波数依存性について評価した。

4.2 実験方法

4.2.1 実験装置

電圧を印加させたときのアクチュエータの変位を測定する装置として、レーザ干渉計(Canon:DS-80)を用いた。このレーザ干渉計は、スペック上0.08nmという超高分解能、最高500kHzの高速応答性のある非接触変位計である。表4.1にその性能をまとめる。この装置の測定原理は、レーザ光マイケルソン干渉方式である(図4.1)。レーザ光源から発した光をハーフミラーで二つに分割し、その分割したレーザの反射光を再びハーフミラーで重ね合わせ、その干渉光から距離を算出するものである。このため、アクチュエータの上面はレーザを反射できるものでなければならない。ここでは、最上部の真鍮電極でレーザを反射させることになる。そのため、せん断方向の測定は0.2mm厚にレーザを当てなければならない。厚み方向の測定と比べ困難である(図4.2)。図4.3に測定装置を示す。ただし、アクチュエータを固定する台によって共振周波数に変化が出てしまったため、その検証を4.4節で行った。

表 4.1 レーザ干渉計 (DS-80)の性能

測定方法	レーザ光マイケルソン干渉方式
使用レーザ	可視光半導体レーザ (波長 650nm, マルチモード)
ワーキングディスタンス	10mm
測定範囲	±50μm
最高分解能	0.08nm
リニアリティ	±0.02%以内
応答周波数	最高 500kHz(±0.05μm 以下振幅時)
対象物	光反射面(散乱面可)

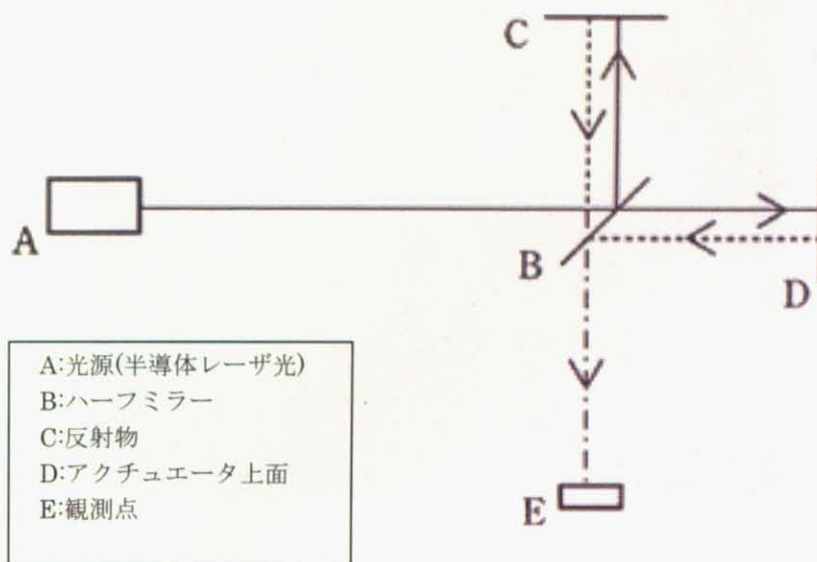


図 4.1 マイケルソン干渉方式

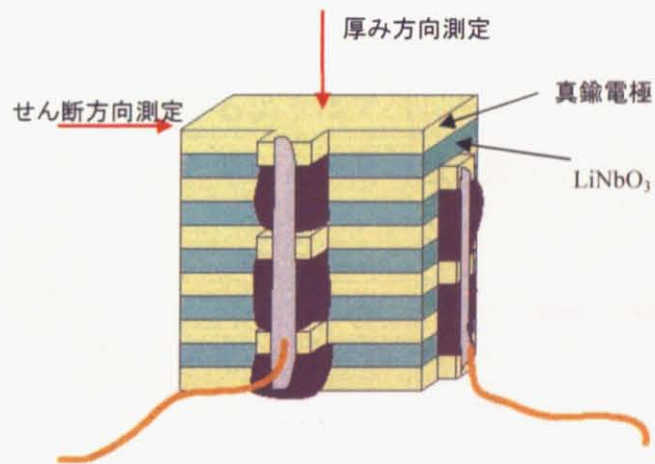


図 4.2 変位測定方向によるレーザー照射難度の違い

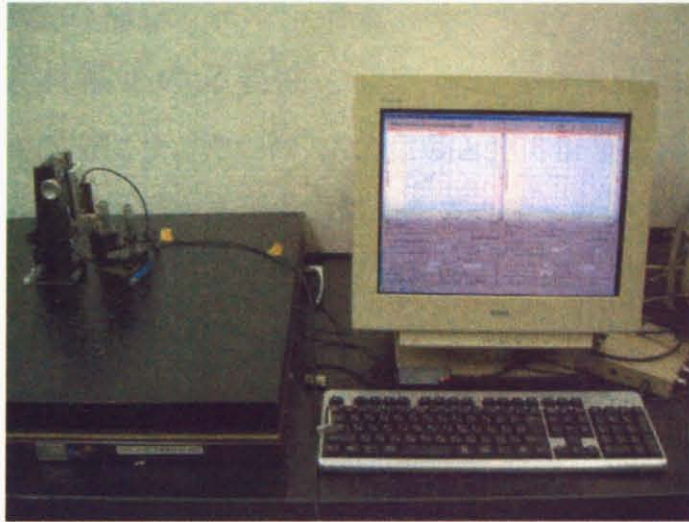


図 4.3 レーザ干渉計インターフェイス

図 4.4 に実験の概略図を示す. まずファンクションジェネレータ (NF 1946) から出された三角波, または正弦波を増幅器 (NF M-2601) を用いて増幅させる. 増幅した入力電圧をアクチュエータに印加し, 印加電圧によるアクチュエータの変位をレーザ干渉計で電圧値として測定し, オシロスコープ (DL 1640) に出力させた. オシロスコープに表示させる出力電圧には, ノイズを除去してアクチュエータの変位のみを表示できるようにアベレージングをかけた. この出力電圧とアクチュエータに入力した電圧との間の線形関係とヒステリシスの有無を確認する.

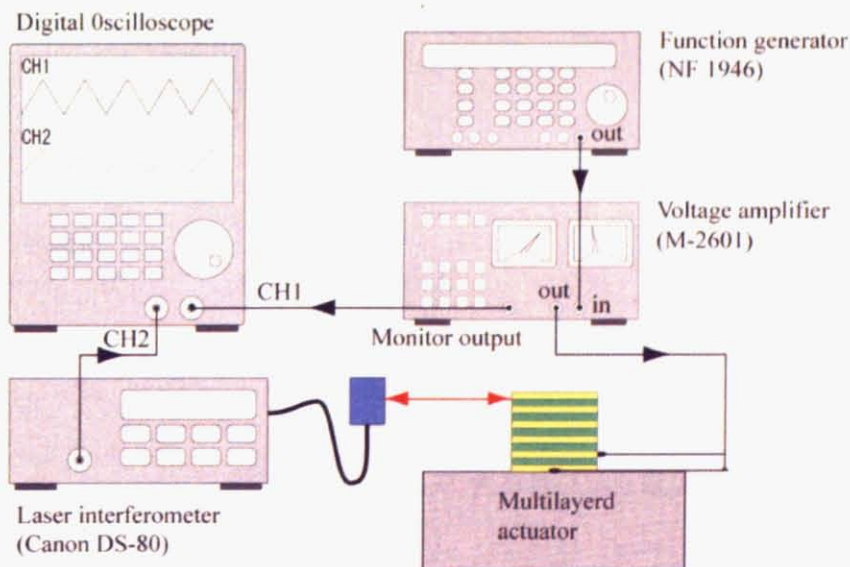


図 4.4 実験の概略図

4.2.2 位相遅れの補正

4.2.2.1 位相遅れ補正の必要性

本測定において問題になったのは、入力信号と出力信号に若干の位相差が生じる点にあった。図 4.5 は、三角波の入力電圧をアクチュエータに印加したときの、入力電圧 (Input) と出力である圧電変位 (Output) をオシロスコープで測定したものである。出力信号が入力信号に対して数十 μsec の遅れを生じている。この位相遅れが生じる原因の一つには、レーザ干渉計での干渉信号を変位へ変換する際の演算処理の遅れがあり、この事実は製造メーカーからも確認がとれている。変位 - 電圧特性の線形性を論じる上で、正確に位相を合わせることは必要不可欠であるため、本項では実験における位相補正について述べる。

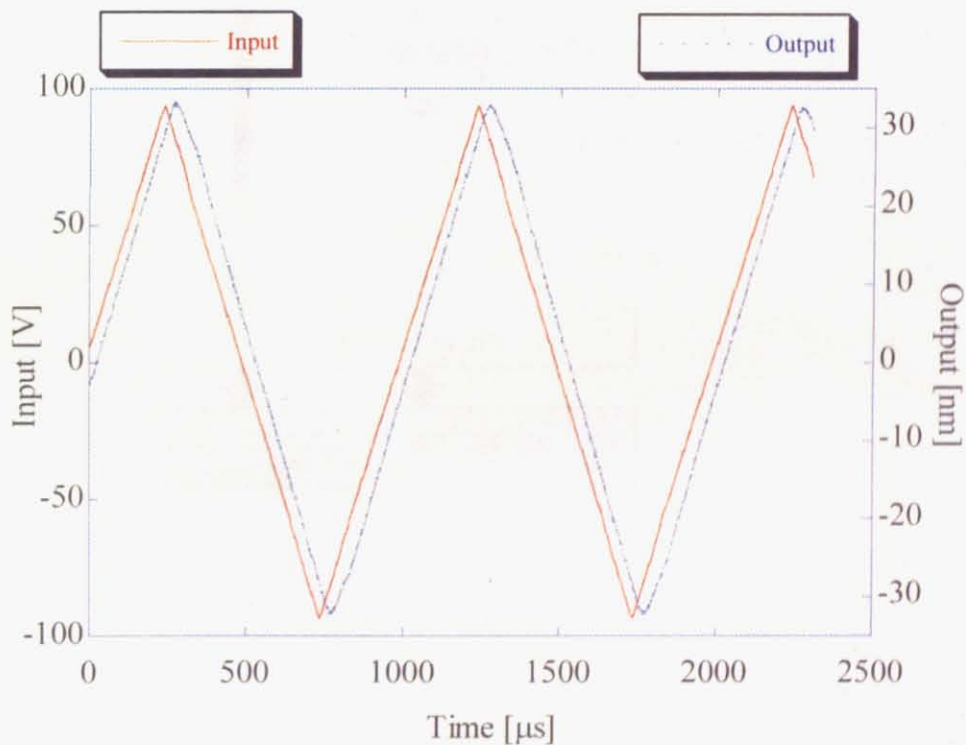


図 4.5 入力に対する出力(圧電変位)の遅れ

4.2.2.2 測定器の位相補正機能を用いた測定

レーザ干渉計(DS-80)では、遅れを補正する測定機能も備わっている。図 4.6 は位相補正を行なう際の装置の接続を示したものである。オシロスコープに表示させる入力電圧を、レーザ干渉計に通して出力の時間遅れ分(演算処理分)だけ遅らせることで補正することができる。図 4.7 は補正無し(図 4.4)で測定した変位 - 電圧特性であり、図 4.8 は位相補正機能(図 4.6)を用いて測定した変位 - 電圧特性である。どちらも 200Vp-p で 1kHz の三角波を入力電圧としてアクチュエータに印加した。ただし、この位相補正の実験には、レーザ干渉計による測定のしやすさから、 36° Y-Cut を使用した Z 方向アクチュエータを用いた。

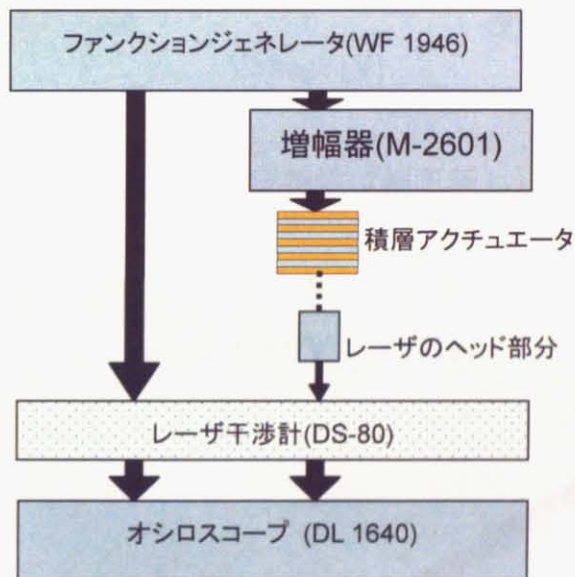


図 4.6 レーザ干渉計の位相補正を行なった測定

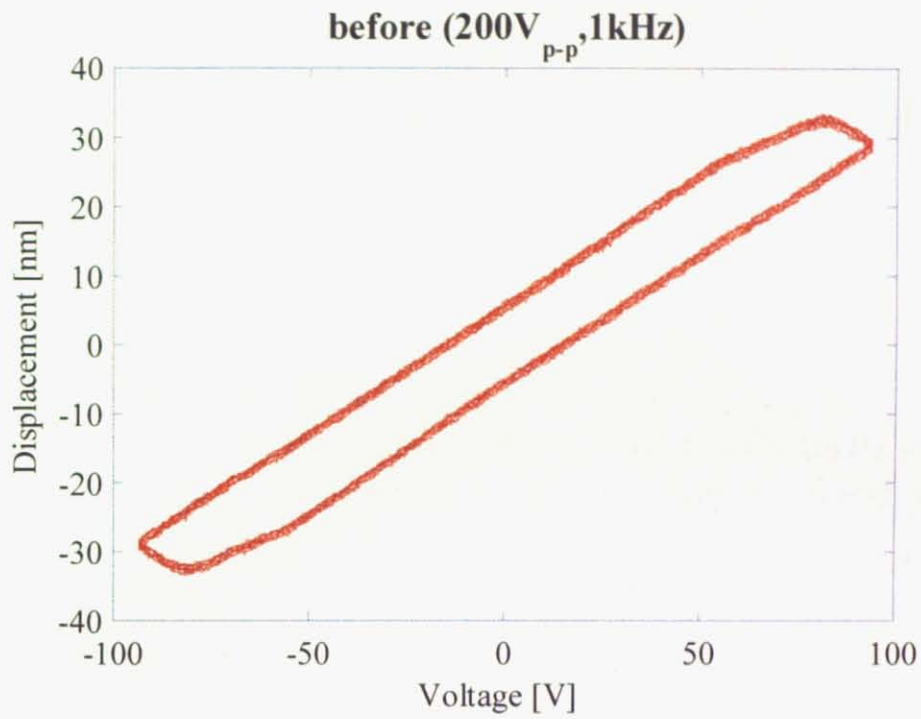


図 4.7 変位 - 電圧特性 (補正無し)

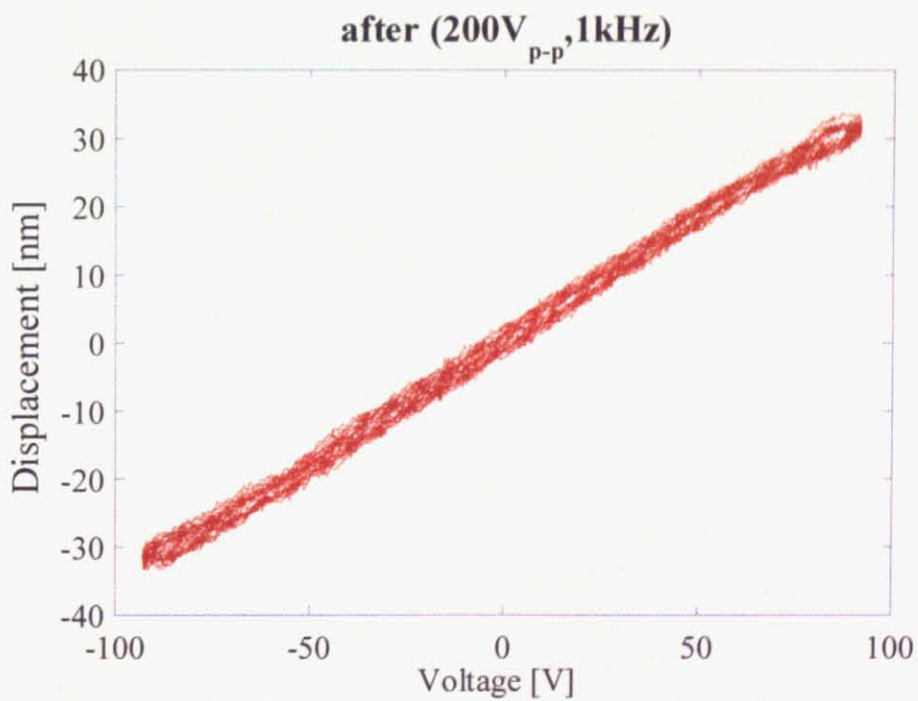


図 4.8 変位 - 電圧特性 (測定器 DS-80 による補正有り)

図 4.7 と比べると、図 4.8 は出力の遅延時間はほぼ補正されている。しかし、測定器の補正機能を用いても数 μsec の位相差があること、また出力信号に AD、DA 変換する際の高周波成分 20kHz が混在することの二つの要因が精密に線形性を評価することの妨げとなっている。そこで、入力電圧と出力電圧の位相差を予め測定しておき遅延時間を求めることでキャリブレーションすることにした。

4.2.2.3 遅延時間の測定

ロックインアンプ (NF:5610B) を用いて、100Hz から 10kHz の周波数で入力電圧と出力変位と、その時間遅れを測定した。時間遅れのグラフについては、4.4 節で詳しく説明する。結果は、図 4.16 のようになった。図 4.16 から、周波数によらず出力信号の遅延時間は 28 μs 前後であることが分かった。4.3 節以降の変位 - 電圧特性のグラフには、4.4 節で測定した遅延時間分を補正してある。ただし、この時間遅れは、測定系全ての合計時間であり、この中には、アクチュエータ自体の応答特性も含まれている。アクチュエータの応答特性は、今回測定した 10kHz までの応答では単体で測定することができなかった。

4.3 変位 - 電圧特性の線形評価

4.3.1 変位-電圧グラフによる線形性評価

試作アクチュエータの変位 - 電圧特性の線形性を評価する。アクチュエータに入力する電圧は、 $100V_{p-p}$ の正弦波とし、周波数は、 $1kHz$ で測定した。レーザ干渉計での演算処理は、 $500nm$ を $2.5V$ として出力されるように設定した。その結果、変位 - 電圧特性は図4.9のようになった。グラフは、入力信号と出力信号の2周期分の変位 - 電圧特性である。Rは相関係数 (Correlation coefficient)を示している。相関係数とは、変数間の結びつきの度合いを数量的に表したものである。この値は0から1の範囲をとり、1に近いほど、よく適合していることを表している。相関係数は $R=0.99992$ と1に限りなく近い値が計算され、優れた線形性が確認できた。また、グラフの傾きは $645 (pm/V)$ と近似され、これは3.4項で算出した値 $660(pm/V)$ と2.3%の誤差であった。

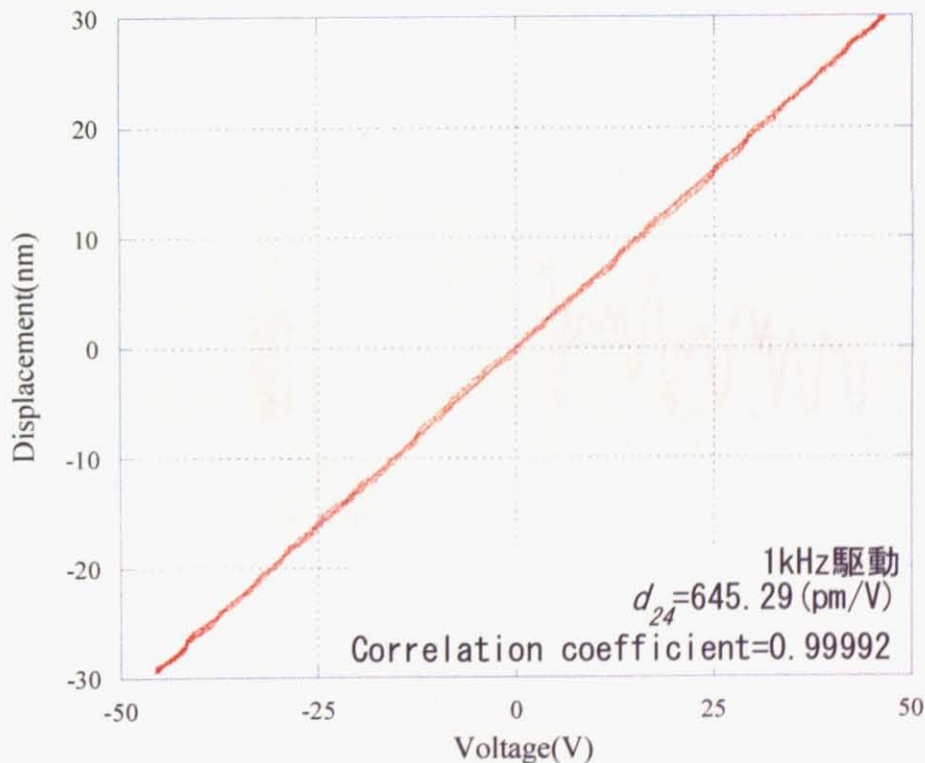


図 4.9 変位 - 電圧特性 ($1kHz$, $100V_{p-p}$)

4.3.2 変位の FFT 特性による線形性評価

圧電変位の非線形性は、駆動周波数に対する 2 倍、3 倍等の高周波成分に起因する。そこで、入力電圧を $100V_{p-p}$ 、100Hz の正弦波に固定し、ロックインアンプの参照周波数を変化させることで、圧電変位の 50Hz から 800Hz の各周波数成分を調べた。実験の概略は、図 4.4 のオシロスコープをロックインアンプに変更したものである。結果、図 4.10 のグラフを得た。縦軸はログスケールである。100Hz の駆動周波数に対し、200Hz、300Hz といった高調波成分にピークは見られなかった。これより、本研究のアクチュエータでは、上記の高周波成分が含まれないことが明らかとなり、圧電変位の線形性を再検証することが出来た。

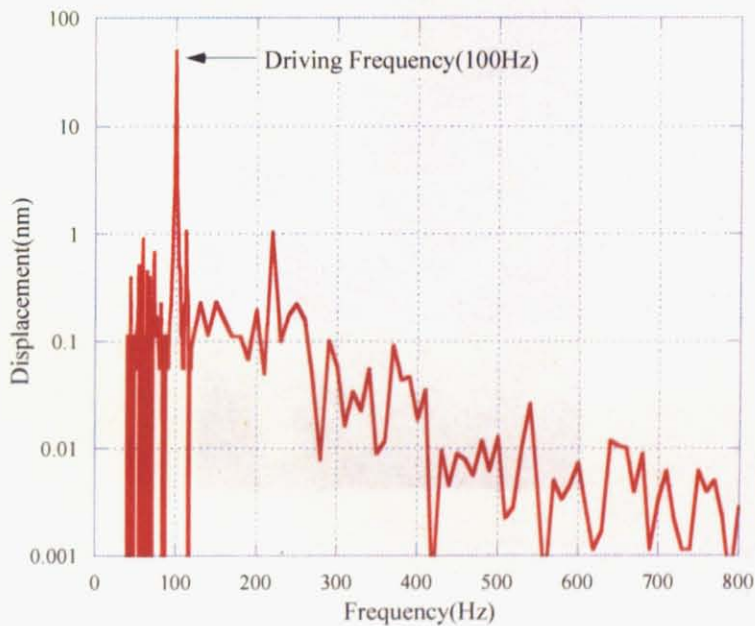


図 4.10 圧電変位の FFT 特性

4.4 圧電変位の周波数依存性および共振特性の検証

アクチュエータへの入力電圧を $100V_{p-p}$ の正弦波とし、ロックインアンプ (NF:5610B)を用いて圧電変位および時間遅れの周波数依存性を測定した。実験の概略は、図 4.4 のオシロスコープをロックインアンプに置き換えたものである。以下に、各固定台の形状および、圧電変位と時間遅れの周波数特性のグラフを示す。時間遅れは、入力電圧波形と圧電変位の波形の位相差 θ (ラジアン)をロックインアンプで測定し、それを $2\pi f$ で割った値である。図 4.11, 図 4.13 についてはアルミ板に接着剤(アラルダイト)を用いて接着し、それを各台にねじで固定した。図 4.15 については、アルミ板を使わず、1000mm 立方のアルミ台に直接アラルダイトで接着した。

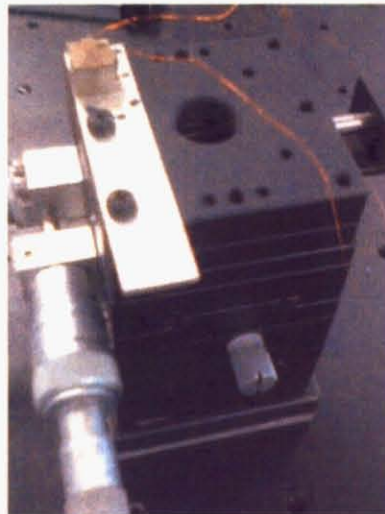


図 4.11 光学 XY ステージへのアクチュエータ固定

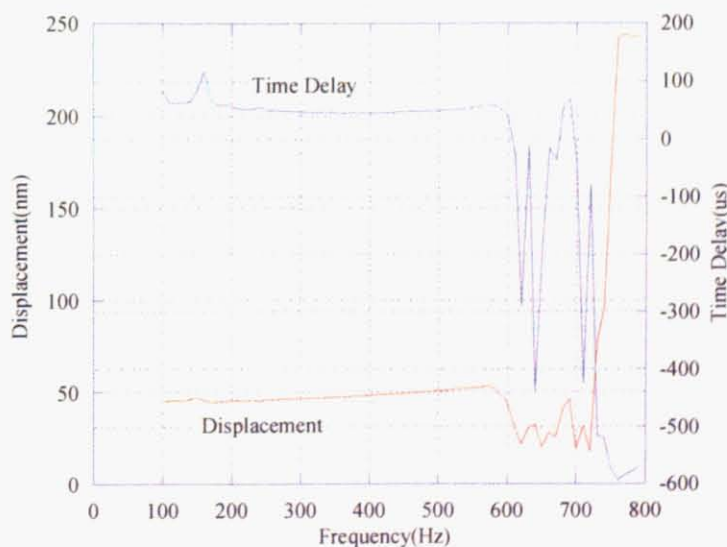


図 4.12 図 4.11 状態での変位および時間遅れ



図 4.13 アルミ板に固定し、それを宙に浮かせた状態

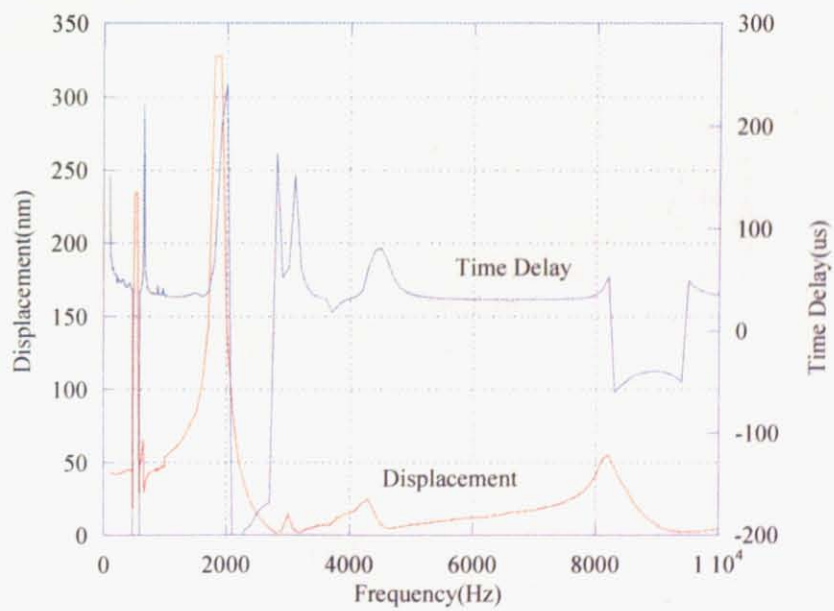


図 4.14 図 4.13 状態での変位および時間遅れ



図 4.15 1000mm 立方のアルミ塊に直接接着

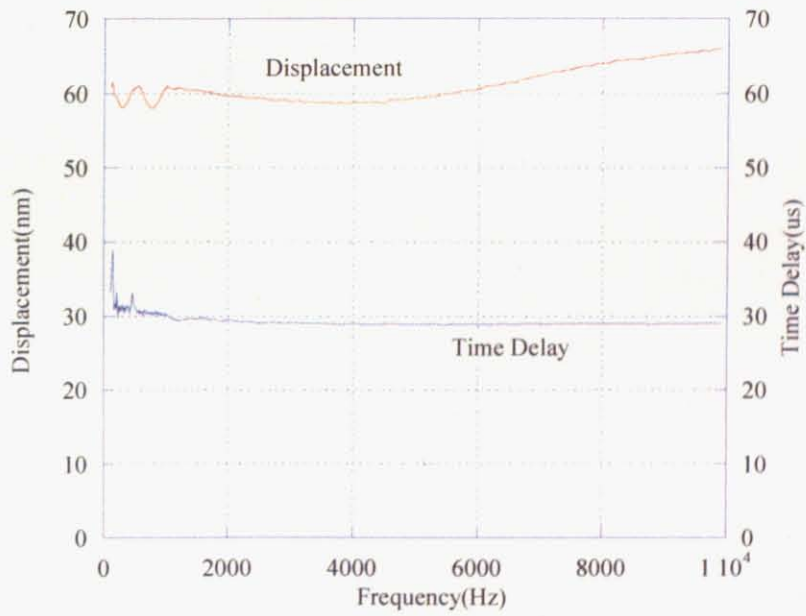


図 4.16 図 4.15 状態での変位および時間遅れ

上記結果より，図 4.11 の可動部を要する XY ステージへの固定の場合では，600～800Hz の間に大きな共振が見られ，図 4.13 の下が宙に浮いた状態になるような固定の仕方では，2kHz 付近で大きな共振が見られる．このように，比較的安定していない固定の仕方の場合，アクチュエータの振動が台にもものってしまう，低周波数で共振が起き，変位や時間遅れなどに大きな影響を及ぼしてしまうということが分かった．しかし，図 4.15 の 1000mm 立方のアルミ塊に直接接着して固定した場合，100Hz から 10kHz までの測定で，非常に安定した値を得ることができた．そこで，この図 4.16 でのほぼ一定である時間遅れの値(28 μ s)を，装置全体の時間遅れとして，補正で用いることとした．

4.5 アクチュエータの最大変位

位置決め装置へ本研究のアクチュエータを実用化する上で、アクチュエータが最大でどこまで変位できるかはその応用範囲を大きく左右する。試作したアクチュエータの最大変位を検証するため、1kHz と周波数を固定して交流電圧をアクチュエータに印加し、その電圧を大きくしていき、どこまで線形性を保つか測定した。その結果、1kV_{o-p} (2kV_{p-p})までは線形性を保つことを確認することができた(図 4.17)。

これ以上の電圧に対しては、積層の電極間が 0.5mm と狭いことから、放電が起きてしまい、安定した測定ができなかった。傾きから計算した圧電定数は 63.99(pC/N)であり、最大変位量は 640nm_{o-p}(1280nm_{p-p})となった。また、1.4 節の図 1.22 によると LiNbO₃ の分極 P(C/cm²)は、20(kV/mm)から-16(kV/mm)までは線形性が確認されている。このため 1.4 節で述べたように、その電界の範囲では変位 - 電圧特性の線形性も期待できる。試作したアクチュエータに用いた LiNbO₃ 単結晶の厚みは 0.5mm であるため、最大印加電圧は

$$0.5 \text{ (mm)} \times (20+16) \text{ (kV/mm)} = 18 \text{ (kV)}$$

である。したがって、試作アクチュエータの最大変位量は、XY ステージ用アクチュエータでは、

$$0.660 \text{ (nm/V)} \times 18 \text{ (kV)} = 11.88 \text{ (}\mu\text{m)}$$

Z ステージ用アクチュエータでは、

$$0.379 \text{ (nm/V)} \times 18 \text{ (kV)} = 6.8 \text{ (}\mu\text{m)}$$

と見積もられる。AFM による原子の観察などでは、走査範囲は数百オングストローム(数十 nm)程度であるため、この程度の変位量があれば実用上問題がないと言える。

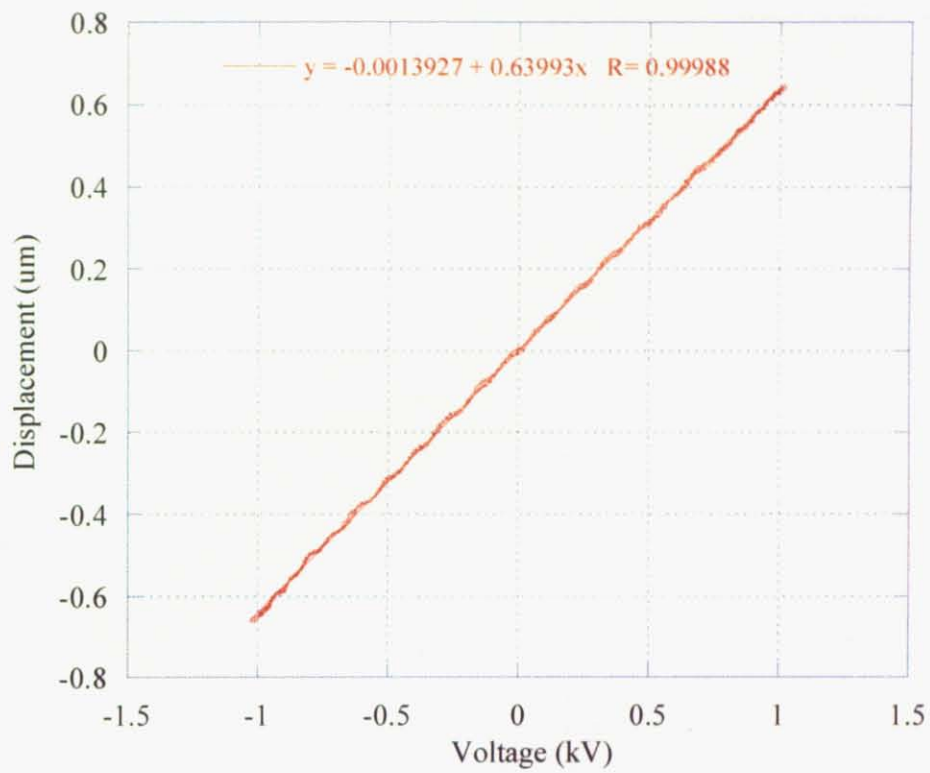


図 4.17 2kV_{p-p}印加時の変位 - 電圧特性

第5章

原子間力顕微鏡への実装

5.1 はじめに

本章では、今までに論じてきた積層アクチュエータの実際の応用例のひとつとして、原子間力顕微鏡への応用について述べる。

原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope; AFM) は、走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope; SPM) の一種である。走査型トンネル顕微鏡 (STM) と違い、導電体だけでなく絶縁性の物質も測定が可能。また STM や走査型電子顕微鏡 (SEM) のように真空を引く必要がなく、大気中で測定が可能である。このため装置が小型かつ安価。液体中や高温～低温など、様々な環境で測定が可能。SEM 用試料のように導電性コーティングなど試料の前処理が不要であり、生体試料などを自然に近い状態で測定できる²⁰⁾。

この AFM の解像度の向上には、カンチレバーの形状や材質と、ステージの精密位置決めが重要である。この精密位置決め部のアクチュエータには、現在は PZT によるアクチュエータが多く用いられている。この PZT にはヒステリシスが存在するため、その補償に関する研究がなされている^{21, 22)}。

また、近年の MEMS や FRAM(強誘電体の分極方向を 1bit とするメモリ)などでは、小型化や集積化を実現する材料として、圧電薄膜が注目されてきている。その変位は極めて小さいため、AFM による測定がなされることが多いが、現在の AFM の主流である、ステージに PZT セラミックを使用しているものでは、微小な変位しかない薄膜では、ヒステリシスの影響により正しい値が得られない。そこで、完全な線形性を持つ LiNbO_3 によるアクチュエータを、PZT アクチュエータの代わりに用いることで、AFM の解像度の向上を図ろうと試み、実際に圧電定数測定を行うことでその検証を行った。

5.2 原子間力顕微鏡の原理

図 5.1 に模式図を示す。XYZ 軸の描かれた少し上にあるステージに試料を載せる。その上に描かれているのがカンチレバーである。ステージを X-Y 軸方向に移動しながらカンチレバーにレーザー光をあると、カンチレバーは試料表面の凹凸によって上下し、その変位はカンチレバーからの反射光がフォトダイオードに当たることで検知される。フィードバック回路によってカンチレバーからの反射光の位置が一定となるように(カンチレバーの高さが常に一定となるように)ステージを Z 軸方向に上下させる。XYZ 軸の動きは圧電アクチュエータによるため、この時の Z 軸方向の制御電圧から、Z 方向の凹凸の大きさが測定できる。X-Y 方向の変位と組み合わせることで、三次元の観察像となる(右下の矢印)。

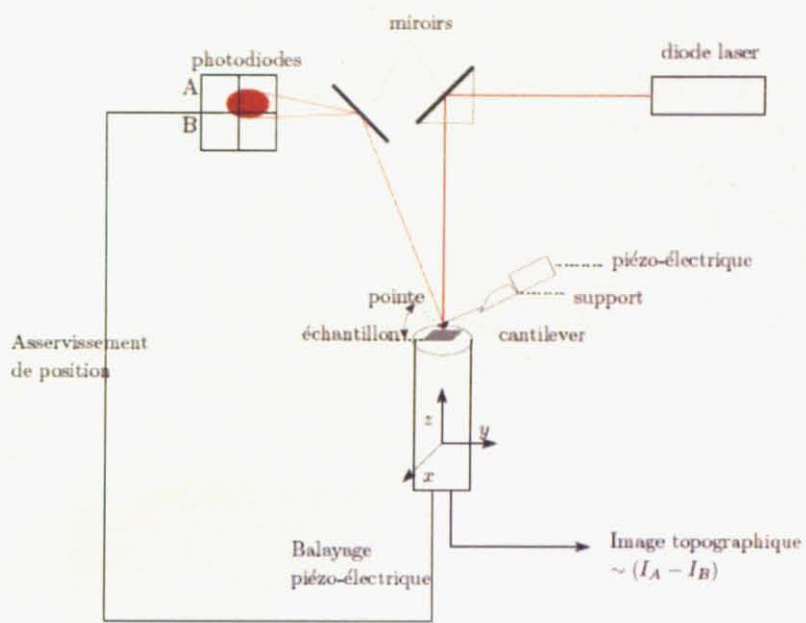


图 5.1 AFM 原理图¹⁶⁾

5.3 設計および組み立て

5.2 節の原理および，自作 AFM に関する六尾氏らの論文²³⁾および川勝氏，新野氏らによる AFM 資料を基に，レーザーの光軸や光検知のフォトダイオード (PD) の位置の微調整ができるように光学 XY ステージや Zθ ステージを組み込み，AFM の外装部分の設計を行った．設計図については，付録に全図を載せた．組み立て後の写真は図 5.2，5.3 のようになる．レーザには，キコー技研の MLXG-A13-670-5 を，光検知部には，浜松ホトニクス製の四分割フォトダイオード S6695-01 を用いた．ウォーカ部については，5.4 節で検証を行った自作ウォーカを用いたもの(図 5.2)と，中央精機株式会社の ALS-301-HM を用いたもの(図 5.3)の 2 種類で試みた．

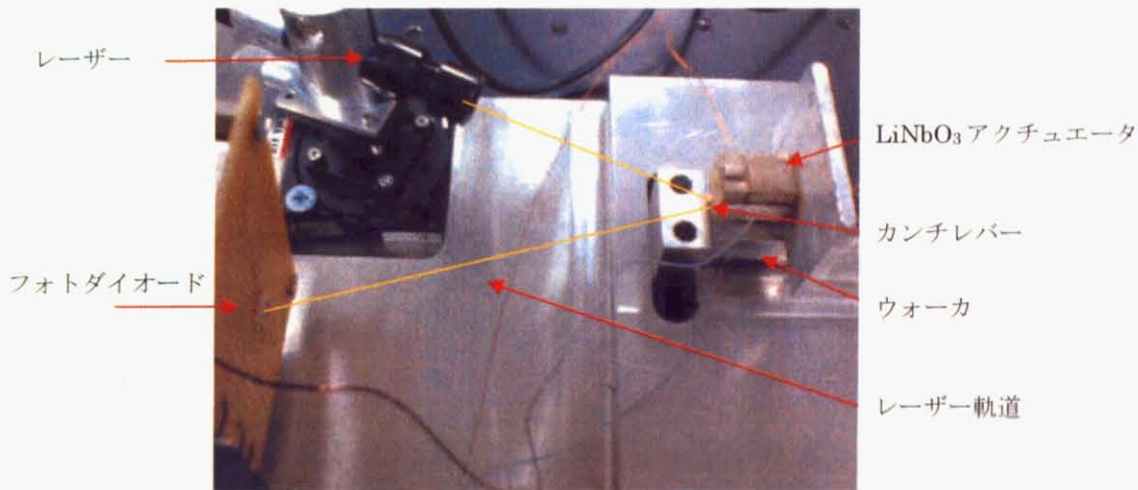


図 5.2 自作ウォーカによる AFM 概観

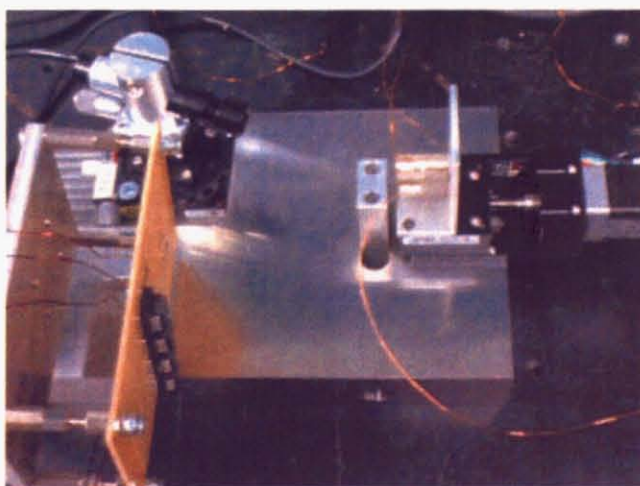


図 5.3 市販ウォーカによる AFM 概観

5.4 ウォーカの動作実験

5.4.1 ウォーカの説明

AFM では、試料はステージに載せ、ステージはウォーカに載っている。ステージは試料とカンチレバーの接触後、試料の像を得るための走査時に動作する。ウォーカは試料とカンチレバーが接触するまで動作し、その後の走査時には動作せず、同じ位置に静止し続ける。ウォーカの原理には、PZT のせん断歪みのスティックスリップを利用している。スティックスリップとは、地面との摩擦による静止と、滑りのことである。これを利用した移動機構については図 5.4 の通りである。

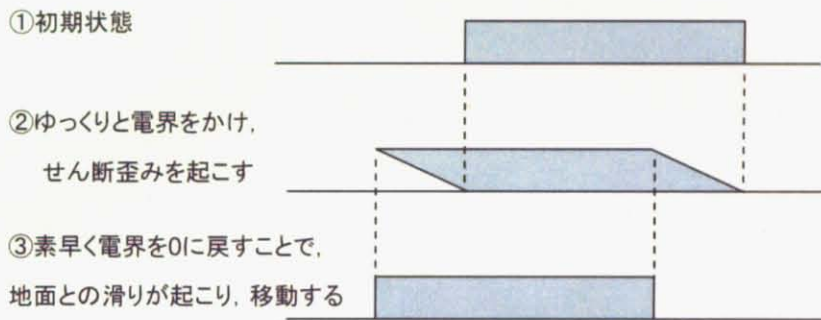


図 5.4 スティックスリップによる移動

自作ウォーカについては、設計したウォーカ下部の四隅に、図 5.4 の原理による、株式会社富士セラミックスの PZT アクチュエータを接着し、さらにルビーボールを各アクチュエータに接着することで、ベース部との滑りをよくした。また、ベース部に溝を掘ってルビーボールを用いたガイドとすることで、進行方向を限定した。図 5.5 に自作ウォーカ概観を示す。ウォーカの上には LiNbO_3 アクチュエータ(XYZ 方向の 3 つ)を接着剤アラルダイトで固定している。

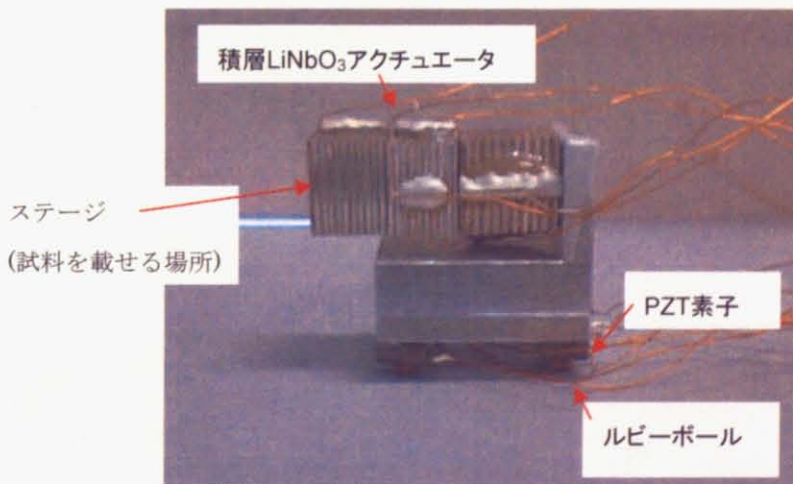


図 5.5 ウォーカ概観

5.4.2 ウォーカ動作実験

図 5.6, 5.7 のようにウォーカのアクチュエータに $100V_{o-p}$, 1Hz の鋸波を印加し, レーザ干渉計で, その変位を確認した. 図 5.6 に示す結果から, 低速で確実にウォーカを進行できたことが分かった. また, 同電圧, 同周波数で, 波形を逆にした鋸波を印加したところ, ウォーカも逆方向に進行した(図 5.7). これにより, ステージとカンチレバーの接触のための粗動が可能であることが分かった.

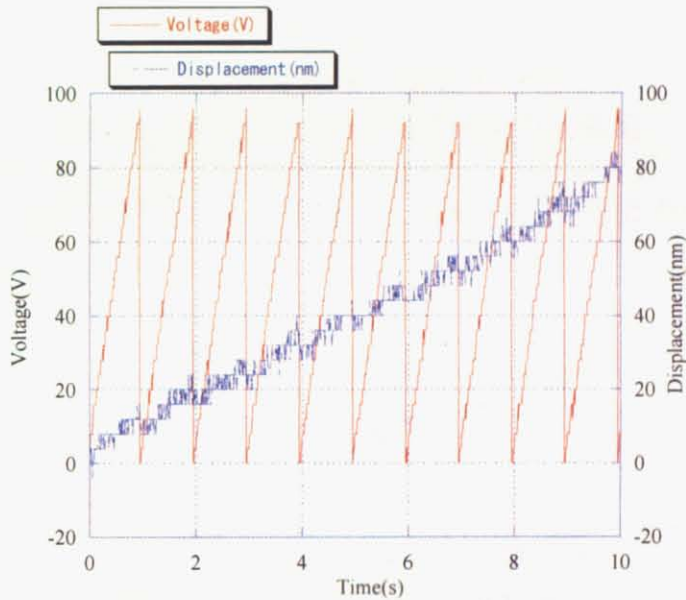


図 5.6 鋸波形印加によるウォーカの動作

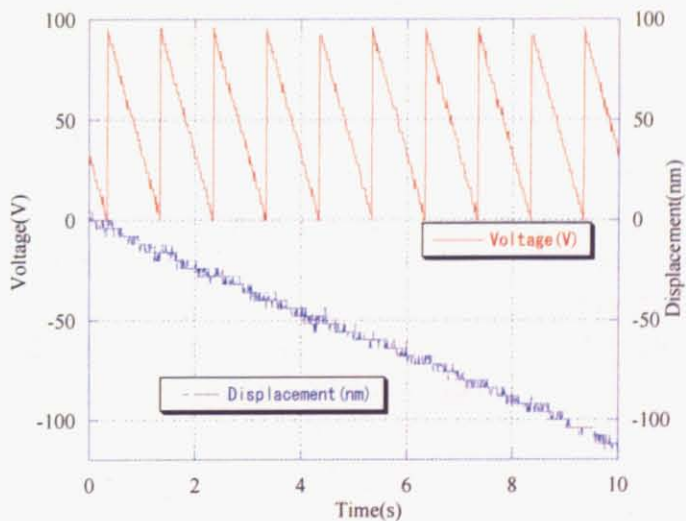


図 5.7 逆鋸波形印加によるウォーカの動作

5.5 圧電定数測定

5.5.1 圧電定数測定の必要性と原理

5.1 節で述べたとおり，AFM の使用例のひとつとして，圧電定数測定がある．原理としては以下の通りである(図 5.8)．

- ① サンプルの圧電材料に交流電圧をかけると圧電振動する．
- ② 何も制御しなければ、カンチレバーがたわみ、フォトディテクタの光の受光位置が変化するが、圧電 Z ステージを制御することで、フォトディテクタの受光位置が変わらないようにする．つまり、サンプル+ステージの変位量が常に 0 となるようにする．
- ③ Z ステージは圧電定数が既知のため、ステージの制御電圧からサンプルの振動の振幅(変位量)を知ることが出来る．
- ④ 試料に加えた電圧と測定した変位量から試料の圧電定数を計算することが出来る．

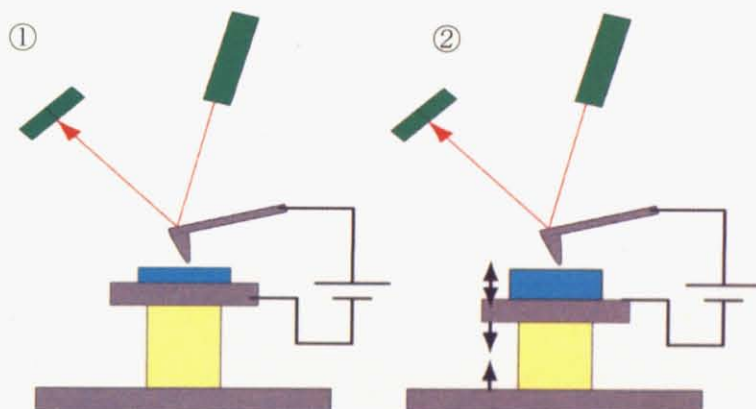


図 5.8 圧電定数測定の原理

5.5.2 電流-電圧変換回路

フォトダイオードは、素子面に当たっている光量に応じて電流を発生させる．オペアンプを用いた電流-電圧変換回路によって電流を電圧へと変換する．回路図は図 5.9 であり，変換式は式(5.1)である．ただし，電源の結線などは図に示していない．実験に使用したレーザーの最大出力:0.6mW，PD の受光感度:0.65A/W であることから，最大出力電流:0.39mA となるはずである．出力電圧が mV～V のオーダーとなるように， $R=10\text{k}\Omega$ で回路を作製した．

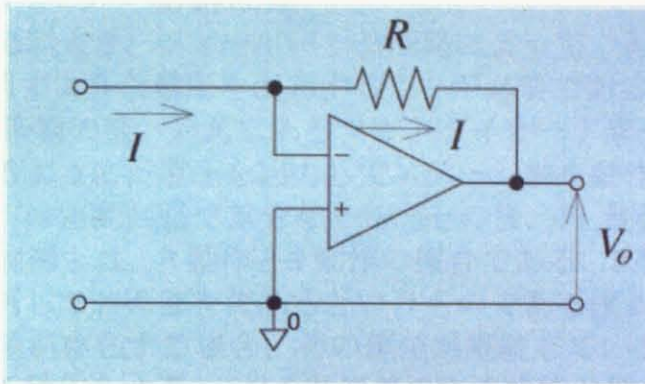


図 5.9 電流-電圧変換回路

$$V_o = -RI \quad (5.1)$$

この変換回路を，四分割の各ダイオードへと接続した．この各ダイオードからの電圧の差分を取ることで位置を検出する．

5.5.3 フィードバック制御回路

圧電定数測定原理より、フィードバック回路によって、入力電圧(変位)に対して、それを打ち消すような電圧を出力することが必要である。具体的には、5.6.1節での電流-電圧変換の後、対角にあるフォトダイオード素子からの電圧の差分が常に一定となるように、電圧を出力してステージ部を動作させる。

そのため、まずは差動回路で差分をとり、その後、PI 制御を介して出力することにした。PI 制御とは、P 動作と I 動作の複合である。P 動作は、目標値と現在値の偏差に比例して制御値を決めるといものである(P は Proportional の略)。そして、残留偏差が存在する場合、その偏差が継続している時間に比例して入力値を変化させる動作をする。つまり偏差のある状態が長い時間続けばそれだけ入力値の変化を大きくして目標値に近づけようとする役目を果たす。この偏差の積分に比例して入力値を変化させる動作を積分動作あるいは I 動作(I は Integral の略)という。上記のように比例動作と積分動作を組み合わせた制御方法は PI 制御という。

実験で使用した回路について図 5.10 に示す。

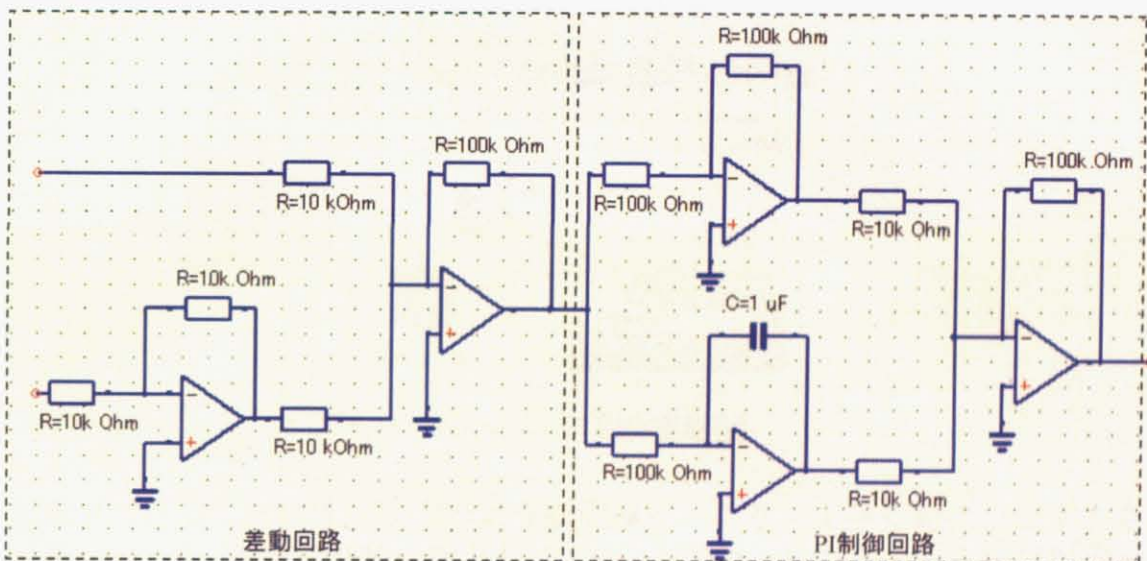


図 5.10 フィードバック回路図

差動回路部分では、等倍の反転増幅(左下部)と通常波形を加算することで、差動回路としている。この加算の時に 10 倍の増幅も行っている。PI 制御部では、並列の上側が等倍の反転増幅(P 動作)、下側が時定数 100ms の積分回路(I 動作)で、それを加算して 10 倍にして出力としている。

実験概略

前節までの回路を使用し、圧電定数測定実験を行った。サンプル用にもステージと同様の 10 層の積層 LiNbO_3 アクチュエータを用いた。つまり、5.1 節、5.5.1 節で述べた圧電薄膜のダミーとして、10 層の LiNbO_3 アクチュエータを用い、ステージ用 10 層アクチュエータとは別々に駆動させるということである。双方とも 36°Y-cut の Z ステージ用アクチュエータである。概略図は図 5.11 のようになる。Function Generator から正弦波を出し、アンプで増幅し、試料に 1kHz, 100Vpp の電圧を印加した。これを打ち消すようにフィードバック回路によってステージの制御電圧が出力されるはずなので、これをオシロスコープで確認した。実際にはオペアンプを用いた回路では 15V 以上は出力できないため、フィードバック回路の出力後、アンプを介してステージへと電圧を印加している。

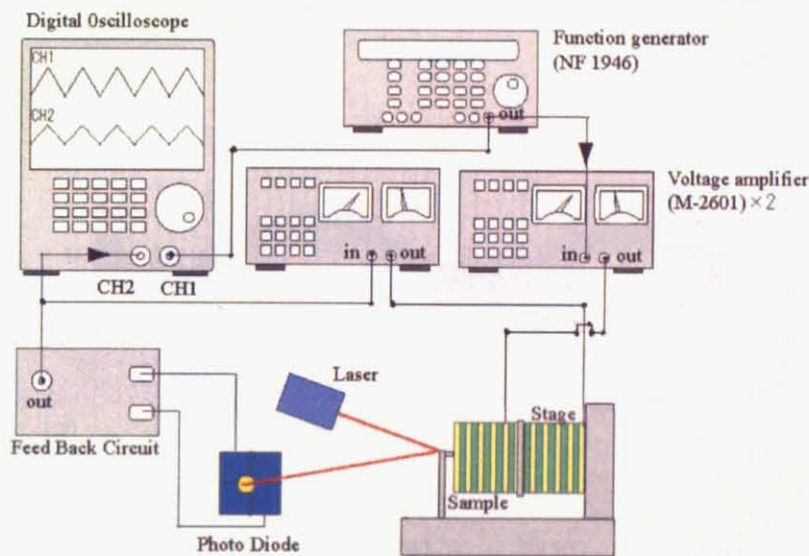


図 5.11 AFM 動作実験概略図

以上で行った実験は、以下のような問題点があり、上手く結果を出すことが出来なかった。実験の初期状態として、レーザのカンチレバーからの反射光を、正確に 4 分割フォトダイオードの中心に当てていなければ、各ダイオードから差分を取ったときに 0 とならず、オフセットが生じる。図 5.10 に示したフィードバック回路は、差分が常に 0 となるように電圧を出力する回路であるため、このオフセット電圧に対しても 0 となるようなフィードバックをかけてしまい、結果として、ナノメートルオーダーの振動を測定するために倍率を高くした回路では、オーバーフローを起こしてしまう。本実験においても、差分回路による位置検出までは出来たが、フィードバック回路については正常に動作させることが出来なかった。

よって、まずはアクチュエータの可能性を示すために、フィードバック回路の代わりに、同周波数で位相を 180° ずらした波形をステージに印加し、目視および手動で差分を 0 となるように電圧値を制御した。ただし、図 5.9 の電流-電圧回路および図 5.10 の差動回路までは使用している。

5.5.4 測定の結果と検証

サンプルの LiNbO_3 結晶板に、1kHz、200Vpp の正弦波を入力した時のフォトダイオードによる変位検知電圧のグラフを図 5.12 に示す。AFM の原理上、この段階ではフォトダイオードからの電圧は変位に変換することができないため、出力電圧のみを示す。Voltage が印加電圧を、Displacement Voltage がフォトダイオードでの変位検知電圧を示す。また、10 層の Z ステージ用アクチュエータの圧電定数は $360(\text{pC/N})$ 前後である¹²⁾。

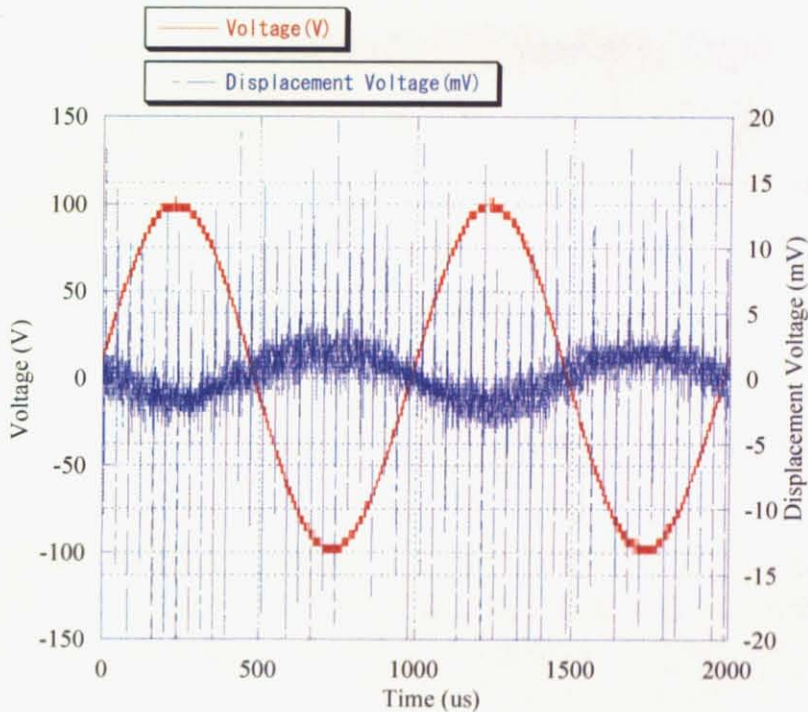


図 5.12 サンプル印加電圧と変位検知

この変位検知電圧が 0 となるように、ステージへの印加電圧を目視と手動により決定した。図 5.13 に結果を示す。赤線がサンプルへの印加電圧であり、緑線がステージへの印加電圧である。ステージの制御電圧を上げることで青線が示す変位検知電圧が小さくなっていることがわかる。ステージへの印加電圧は、周波数はサンプル電圧と同じ 1kHz で、位相を 180° ずらしたものである。

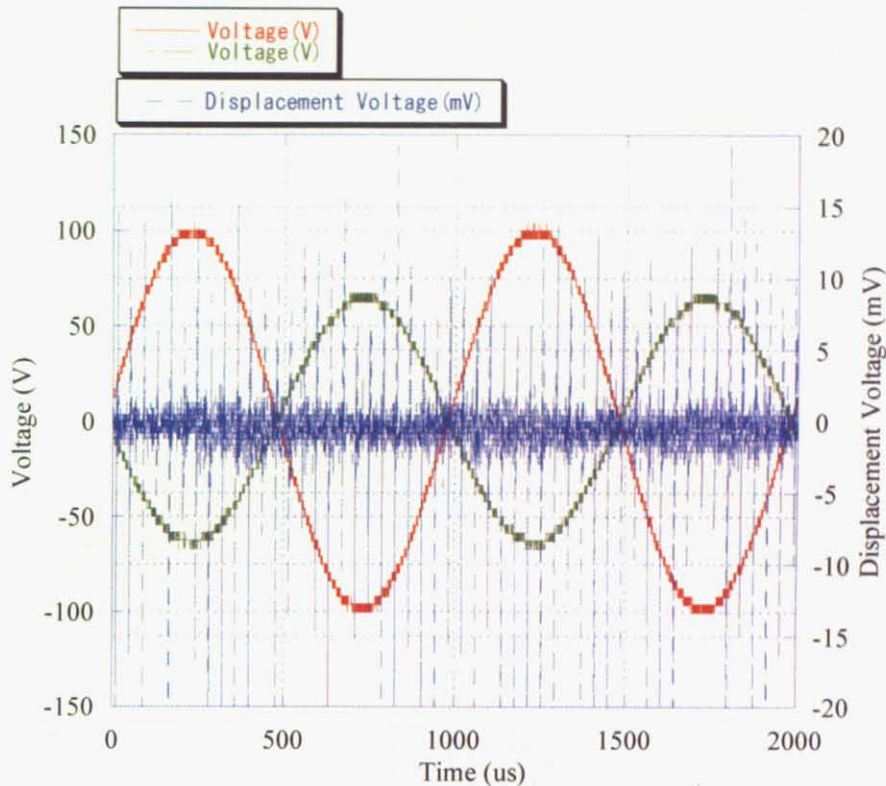


図 5.13 サンプル，ステージ印加電圧と変位検知電圧

サンプルへの印加電圧は $200V_{p-p}$ ，図 5.13 でのステージへの印加電圧は $140V_{p-p}$ であった。つまり，このサンプルの圧電定数を計算すると，ステージの圧電定数 $360(pC/N)$ および制御電圧から，サンプル変位は，

$$360(pC/N) \times 140 (V_{p-p}) = 50.4(nm)$$

サンプルの駆動電圧は $200V_{p-p}$ であるため，圧電定数は，

$$\frac{50.4(nm)}{200(V)} = 252(pC/N)$$

1 層あたりの圧電定数は $25.2(pC/N)$ となる。そもそも，サンプル，ステージともに $LiNbO_3$ の 10 層の積層アクチュエータであるため，同電圧となることが望ましいが，3 割もの差がでてしまった。これは，目視によって変位電圧値を 0 としていること，アクチュエータ自体が自作のため，常に同じ性能であるとは限らないこと，サンプルとステージの体積および質量がほぼ等しいため，お互いの振動の影響を受けやすいことなどが原因として考えられる。しかし，かなり大雑把な実験であるにもかかわらず，ナノメートルオーダーでの変位の制御を行い，3 割程度の誤差で圧電定数を測定することが出来たので，今後の性能の向上に期待ができる。

第6章

結論と今後の展望

6.1 結論

本研究では、高精度な位置決めを可能にする圧電材料としてLiNbO₃に着目し、それを用いて製作した圧電アクチュエータの変位・電圧特性に線形性がありヒステリシスも生じていないことを確認した。Zステージ駆動用には36°Y-cutの結晶板を、XYステージ駆動用には163°Y-Cutの結晶板を用いることが最適であることを導いた。結果として、10枚の積層で作製したXYステージ駆動用アクチュエータの圧電変位は、100Vあたり64nmで、計算結果(66nm)とほぼ一致した。また、駆動電圧の周波数に対する変位の周波数に高周波成分がないことから線形性を確認した。測定時にアクチュエータを固定するステージや方法によって、低周波数での共振が起こることに対して、固定方法やステージの種類を最適にすることで、この共振をなくすことができることを示した。アドミタンスの測定によって、等価回路定数を算出し、電気機械結合係数 $K=21\%$ 、機械的品質係数 $Q=33$ であることを測定した。単結晶LiNbO₃のみとして考えた場合の $Q \geq 10^5$ と比べると小さい値であるが、これは、積層にするために挟んでいる電極や接着剤による剛性の低下が原因と思われる。最後に、具体的なアプリケーションへの応用例として、原子間力顕微鏡(AFM)への実装を試み、精密測定の可能性を示した。

6.2 今後の展望

まずは、AFMの制御系の改良が必要である。フォトダイオードからの変位電圧のS/N比の向上と、回路による正確なフィードバックが出来れば、現状のヒステリシスのあるPZTを使ったZステージでは困難であった、圧電薄膜の圧電定数の測定が可能となるはずである。

様々なアプリケーションへの応用を考えると、アクチュエータの温度特性や、ドリフトについての測定も必要となってくる。

圧電定数の小ささから、アクチュエータとしての応用例の少ない LiNbO_3 であるが、その他の特性を検証すると、アクチュエータとして使用する場合の長所も数多い。今後、更なる研究の広がりが出てくることを期待したい。

参考文献

- 1) ニューケラスシリーズ編集委員会：圧電セラミックスの応用，学献社，1989
- 2) 株式会社富士セラミックス：圧電セラミック テクニカルハンドブック
- 3) 田中哲郎，岡崎清，一ノ瀬昇：圧電セラミック材料，学献社，1973
- 4) 内野研二：強誘電体デバイス，2002
- 5) 電気学会：誘電体现象論，電気学会大学講座，2001
- 6) 新生工業(株)：超音波のページ，<http://www.tky.3web.ne.jp/~usrmotor/topj.html>
- 7) 篠田正紀：身近な MEMS デバイスの動作原理を理解する，インクジェットプリンタ <http://ns.cqpub.co.jp/dwm/contents/0078/dwm007800990.pdf>
- 8) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会：弾性波素子技術ハンドブック，1991
- 9) 中村僖良：<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/~nakamura/actu.html>
- 10) 超音波便覧編集委員会：超音波便覧，丸善，1999
- 11) 中村僖良：精密制御用ニューアクチュエータ便覧，フジテクノシステム，1994
- 12) V.Gopalan : Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices, Volume4: Ferroelectrics and Dielectrics, 2001
- 13) N.SCHMARJE et al.: Nondestructive Testing and Evaluation, Vol.20, No.2, pp.77-87, June 2005
- 14) Stewart Sherrit: the Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference, SPIE Vol.5761-48, 2005
- 15) T.Morita et al.: The Japan Society of Applied Physics Vol.40(2001)pp.3801-3806 Part1, No.5B, May 2001
- 16) A.Kawamata, H.Hosaka, T.Morita:Proc. ACTUATOR 2006,pp.652-655
- 17) A.W.Warner et al.: ASA,1967
- 18) Wang Yue, Jiang Yi-jian:Optical Materials 23 (2003) 403-408
- 19) 株式会社山寿セラミックス:Products of YCC, 2005
- 20) 原子間力顕微鏡 wikipedia：<http://ja.wikipedia.org/wiki/原子間力顕微鏡>
- 21) Qiangxian Huang et al.:Sensors and Actuators A 125 (2006) 590-596
- 22) Yonggui Lv, Yanding Wei:Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Auttotation, June 15-19, 2004, Hngzhou, P.R.China
- 23) T.Mutsuo, Hideki Kawakatsu et al.: Japanese Journal of Applied Physics Vol.43, No.7B, 2004, pp.4615-4618

謝辞

本論文の執筆にあたり、素晴らしい研究テーマを提供して下さり、研究内容、研究手法について親身にご指導して下さった森田剛助教授に心よりお礼を申し上げます。また、研究会などで、数々の鋭い指摘を頂いた保坂寛教授に感謝いたします。また、担当の教官でないにも関わらず、実験室によく足を運び、実験方法などに数多く助言をして頂いた佐々木健教授にも、感謝致します。

また、原子間力顕微鏡の参考図面を提供して下さった、川勝英樹教授、新野俊樹助教授、および双方の研究室の皆様方に多大なる感謝の意を表します。

蒸着アクチュエータの作製にあたって、積層および電極付けの作業を行っていただいた、フルウチ化学株式会社の相沢隆様、有限会社オプトセラミックスの大西康司様にも、感謝いたします。

本研究室において同じ強誘電体グループとして、共に研究に励み、近しい研究内容について議論をし合った、学部4年の門田洋一氏、修士1年の川俣昭人氏、高瀬龍馬氏、修士2年の小田有記氏に心から感謝いたします。

最後に、1年間にわたり数多くの協力をして下さった環境情報学研究室の皆様
に感謝すると共に今後の益々の御活躍をお祈り申し上げます。

2007年2月

付録

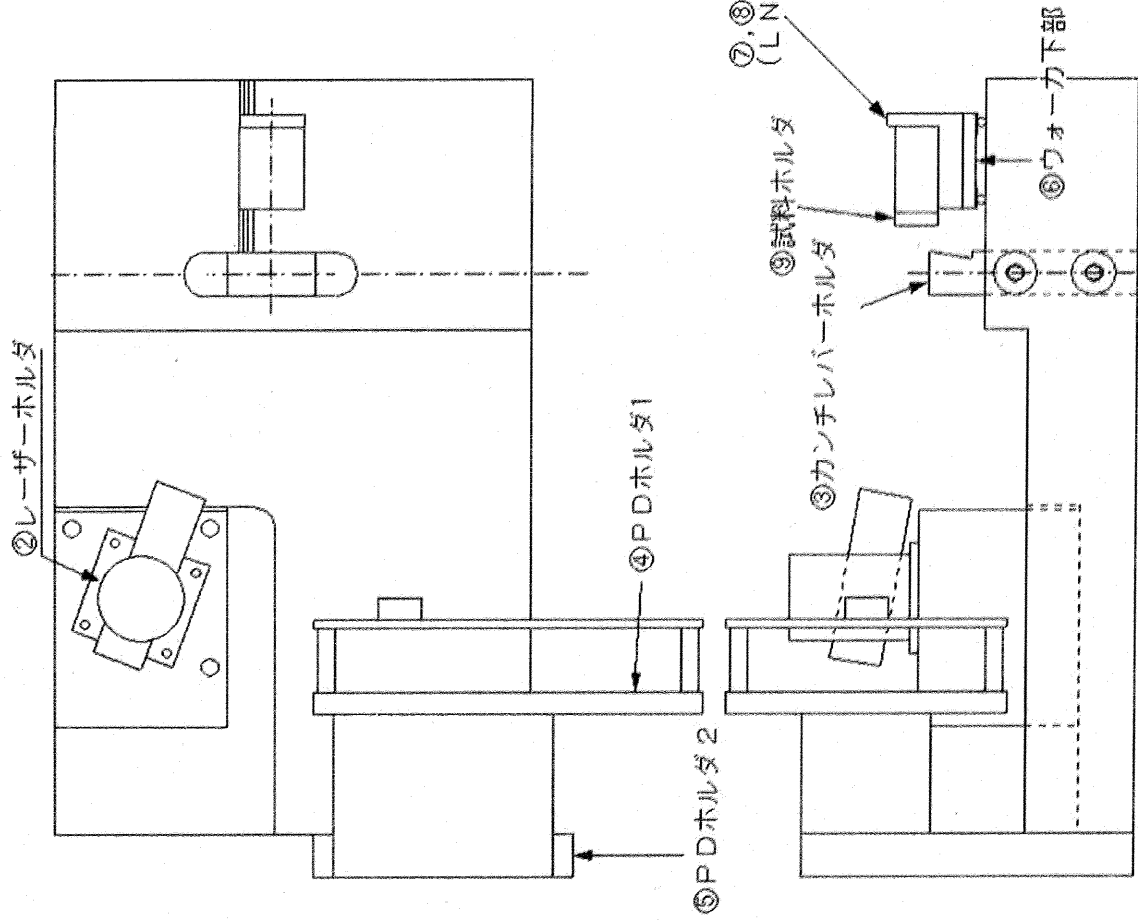
原子間力顕微鏡

外装設計図

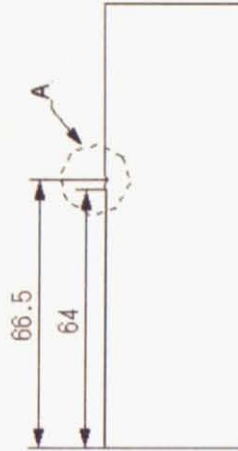
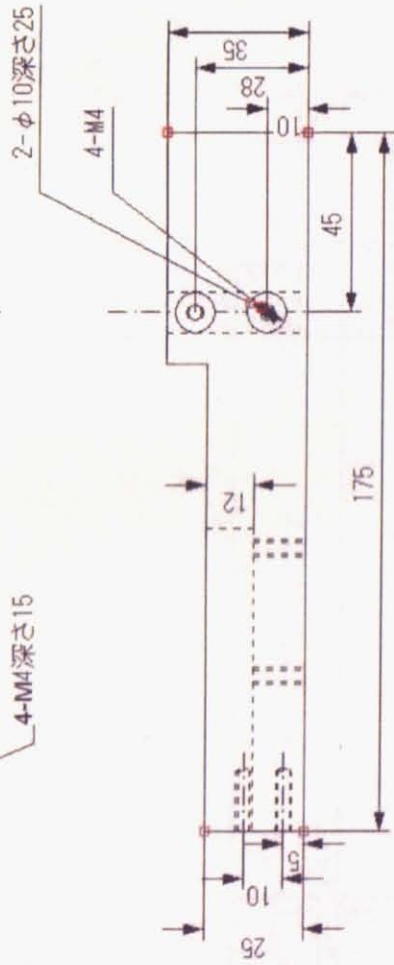
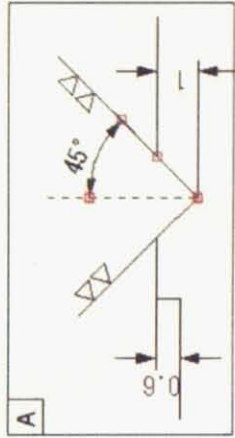
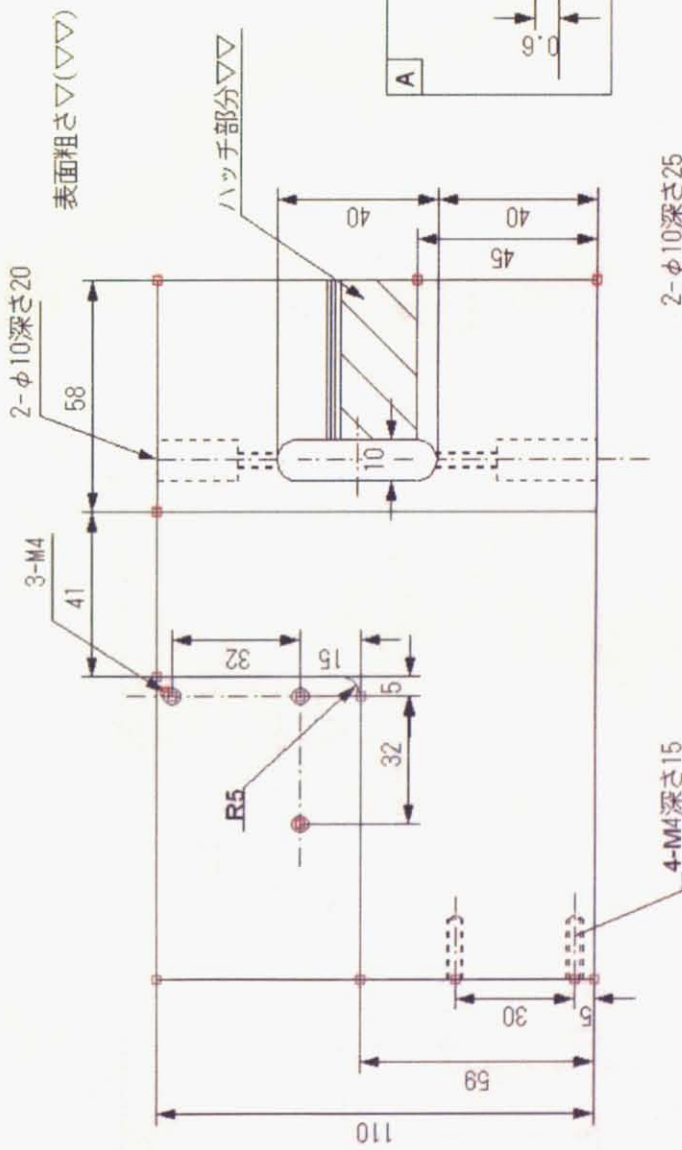
付録

5章で使用した原子間力顕微鏡の外装の設計図を以下に載せる。

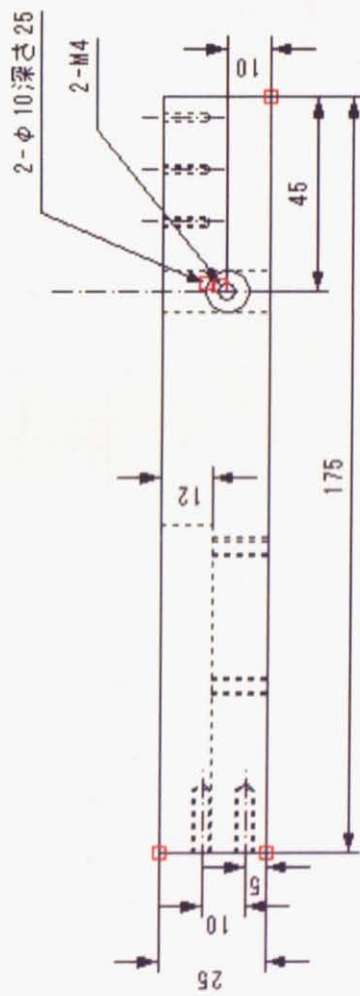
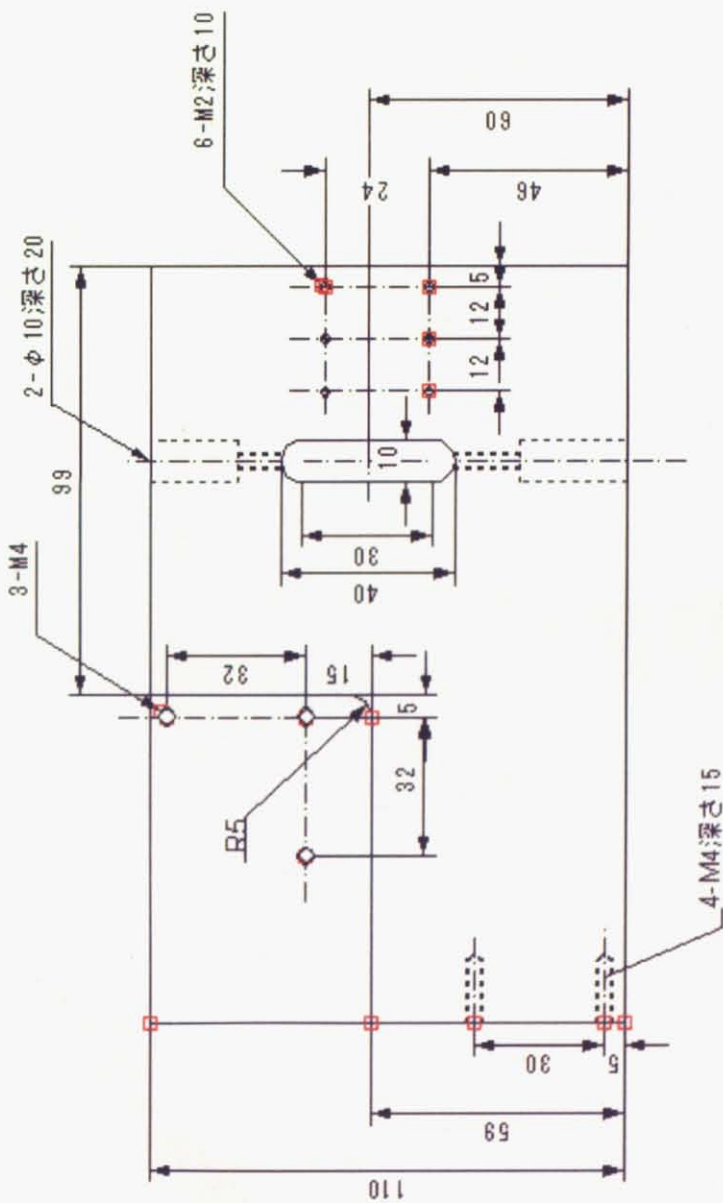
「ベース」は、自作のウォーカを載せるための台であり、「AFM ベース 2」は、市販のマイクロ X ステージ ALS-301-HM を載せるための台である。この二つはそれ以外の違いはなく、レーザやフォトダイオードの固定などは同様の位置にできるようになっている。また、ウォーカボディの PZT 用は、 LiNbO_3 アクチュエータとの比較用に、PZT アクチュエータによる位置決めを試みようとしたためであるが、実際には用いなかった。試料ホルダは、圧電薄膜の圧電定数の測定に用いる予定であったが、やはり今回は使用しなかった。



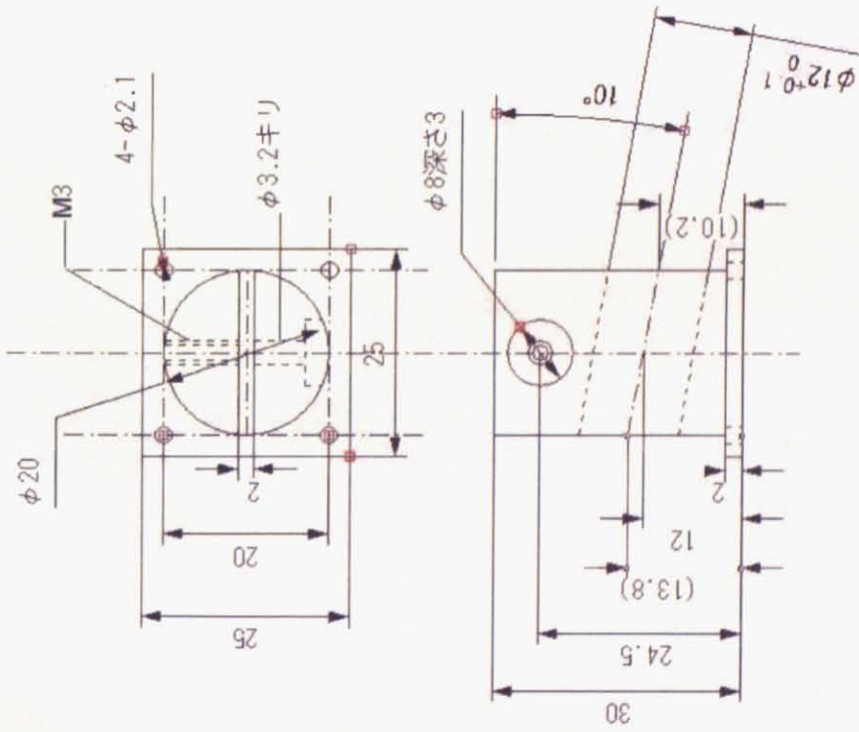
9	試料ホルダ	5	アルミ
8	ウオーカーボティPZT用	1	アルミ
7	ウオーカーボティLN用	1	アルミ
6	ウオーカー下部	1	アルミ
5	PDホルダ-2	1	アルミ
4	PDホルダ-1	1	アルミ
3	カンチレバーホルダ	1	アルミ
2	レーザーホルダ	1	アルミ
1	ベース	1	SUS304
番号	図名	個数	材質
尺渡	2:3	投影法	
所属	作図者		
	実務工学	松本 豪	



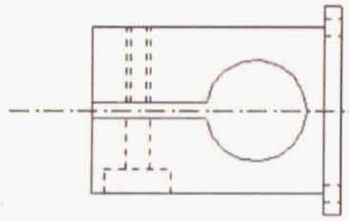
1	ベース	番数	1
1	図名	材質	SUS304
1	尺渡	1:5:1	1
1	所属	東京大学	作図者
			松浦 俊



1	AFM01-22	冊数	1
図名	図名	材質	ステン
尺渡	1.5:1	投影法	第一角
所属	東京大学	作成者	松波 俊

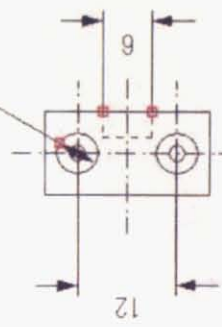


表面粗さ▽



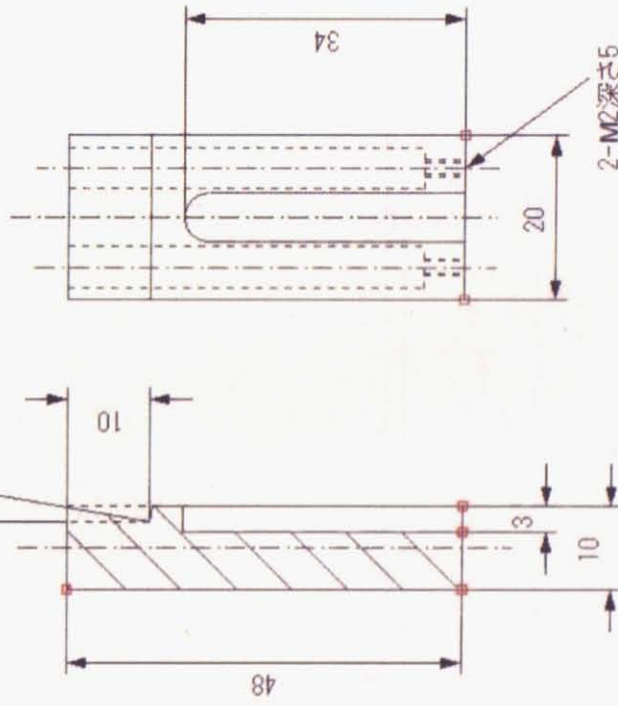
2	レーザーホルダ	個数	1
番号	図名	材質	アルミ
尺度	1:0.75	投影法	
所属	東京大学	作成者	松波 豪

2-φ5深さ43



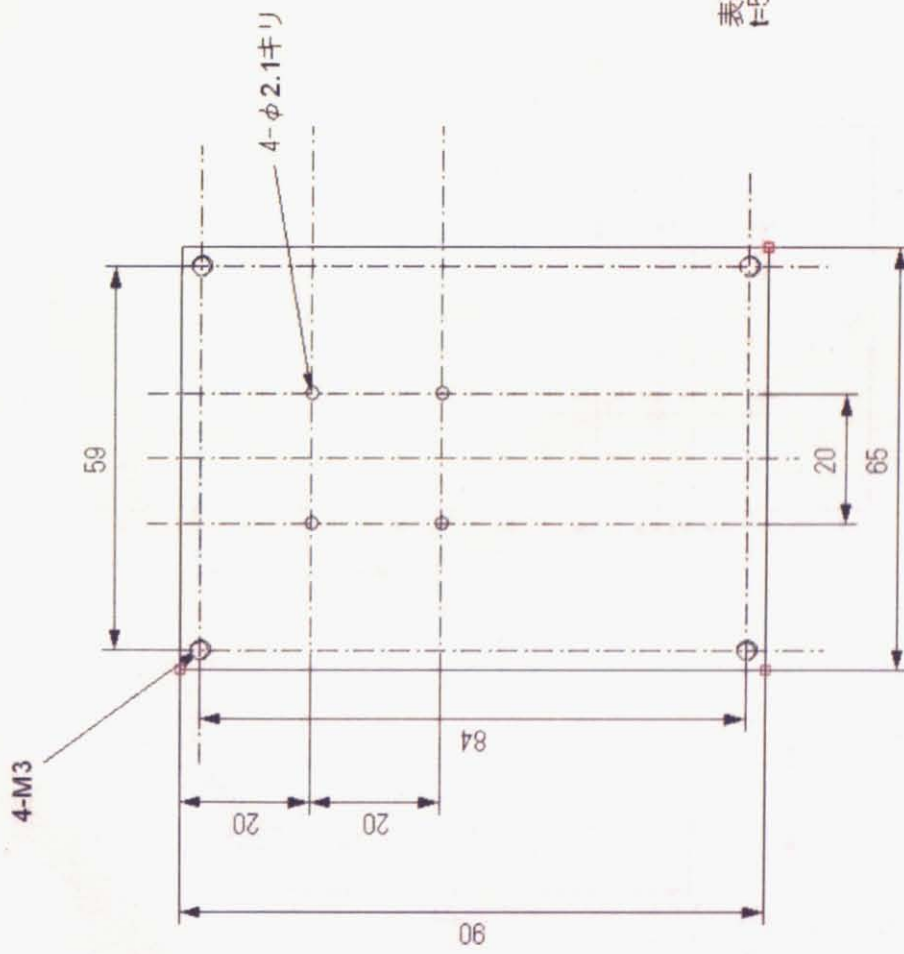
表面粗さ▽

10°



2-M2深さ5

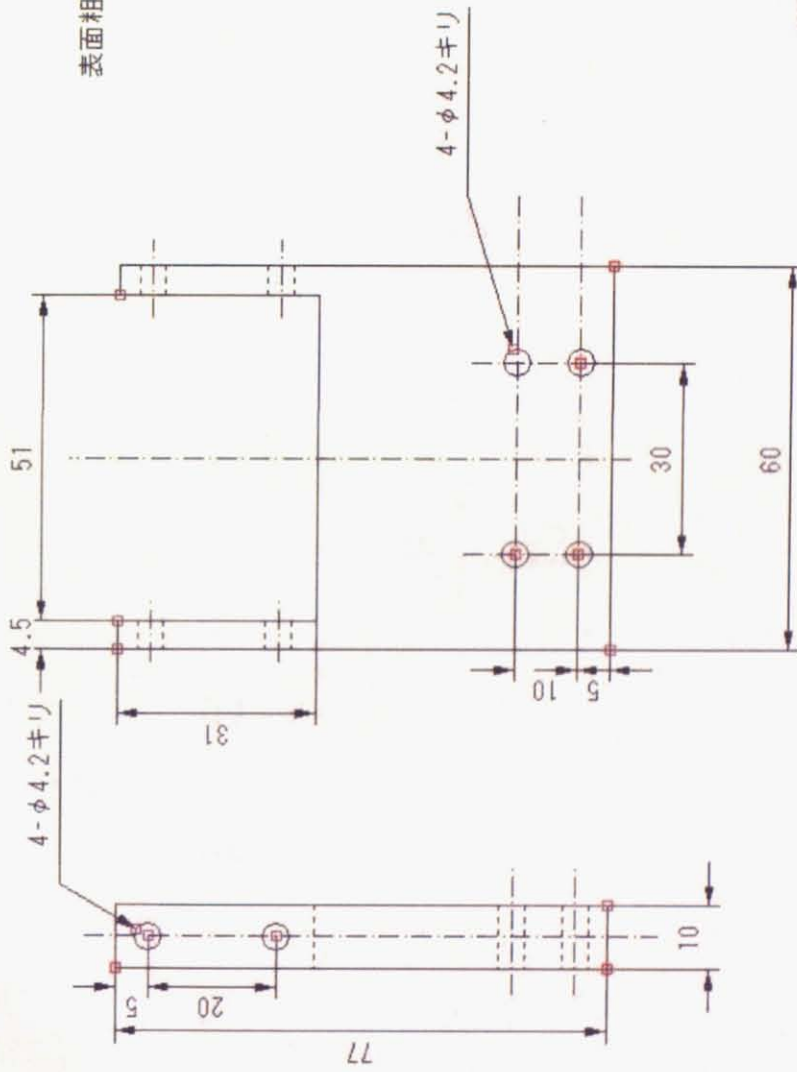
3	カンチレバーホルダ	個数	1
番号	図名	材質	アルミ
尺度	1:0.75	投影法	第一角法
所属	作成者	松波 豪	
	東京大学		



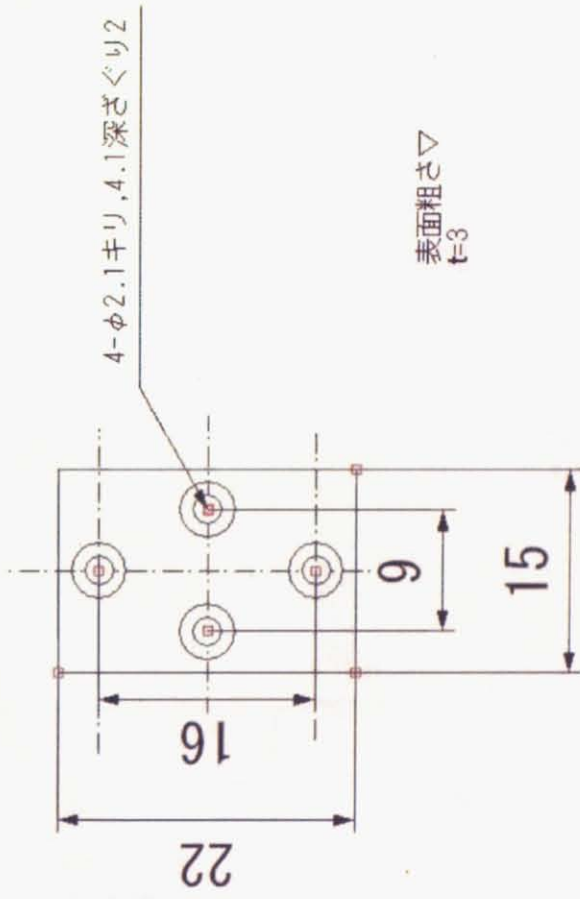
表面粗さ▽
t=5

4	PDホルダー1	個数	1
番号	図名	材質	アルミ
尺度	1:1	投影法	第一角法
所属	東京大学	作成者	松波 豪

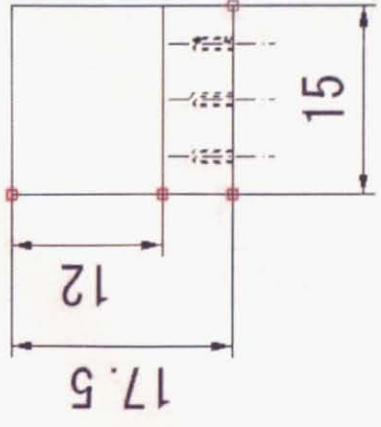
表面粗さ▽



5	PDホルダ2	個数	1
番号	図名	材質	アルミ
尺度	1:1	投影法	第一角法
所属	東京大学	作成者	松波 豪

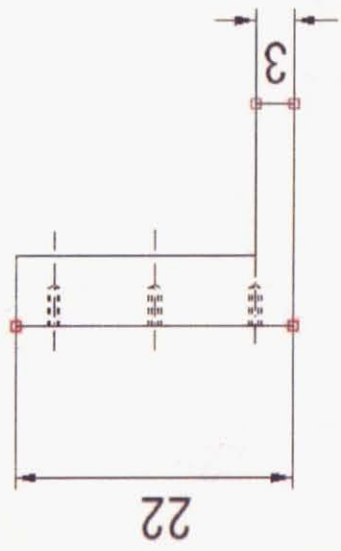
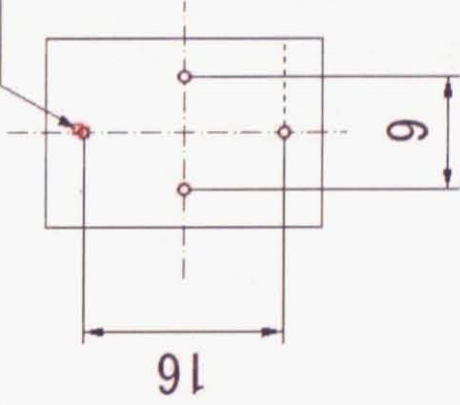


6	ウォーカ下部		個数	1
番号	図名		材質	アルミ
尺度	2:1	投影法	第一角法	
所属	東京大学	作成者	松波 豪	

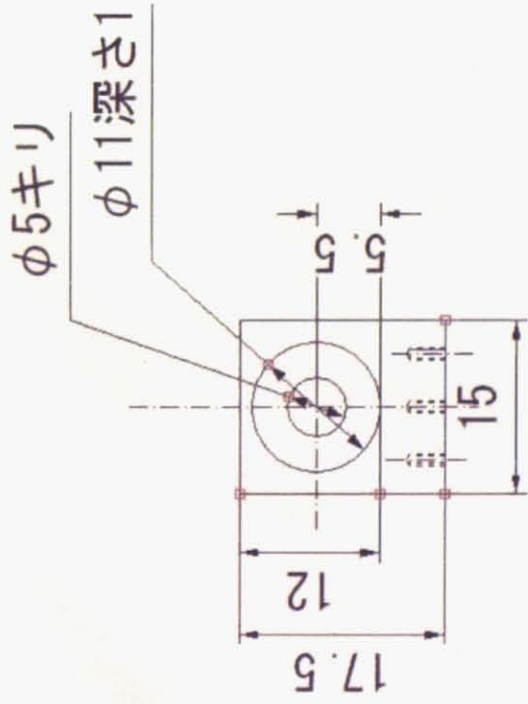


表面粗さ▽

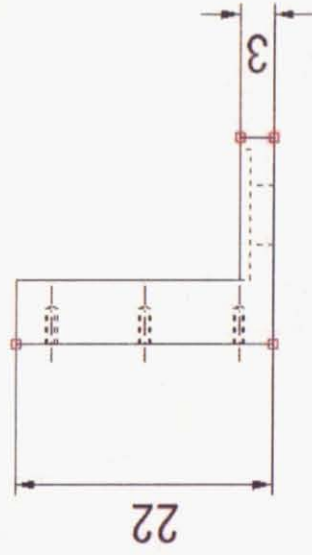
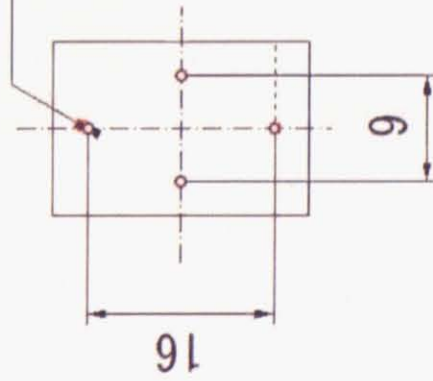
4-M2深さ3



7	ウォーカーポディン用	個数	1
番号	図名	材質	アルミ
尺度	2:1	投影法	第一角法
所属	作成者	松波 豪	
	東京大学		

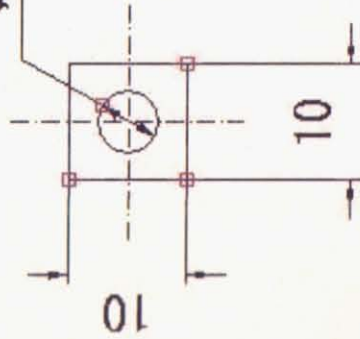


4-M2深さ3



8	ウォーカーボディPZT用	個数	1
番号	図名	材質	アルミ
尺度	2:1	投影法	\varnothing
所属	作成者	松波 豪	
	東京大学		

φ5.2深さ1.6



表面粗さ▽
t=3

9	試料ホルダ	個数	5
番号	図名	材質	アルミ
尺度	2:1	投影法	第一角法
所属	東京大学	作成者	松波 豪