

修士学位論文

リニアコライダー加速器のための  
 piezoアクチュエーターを用いた  
 振動制御システムの開発

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

56116

森田 裕一

平成 19 年 1 月

## 概要

次世代の大型加速器実験である国際リニアコライダー (ILC) 計画ではIR (Interaction Region) 付近の電磁石を 1nm 精度でアライメントすることが要求されている。これは ILC の電子、陽電子ビームの縦方向のビームサイズを IR で数 nm にまで絞るためである。このため、1nm 精度のアライメントが可能な台座が製作された。台座には 6 つの piezoアクチュエーターが組み込まれており、これらの伸縮により約 700kg までのコンポーネントを上に乗せて 1nm 精度でアライメントができる。しかし、単にアライメントを行っただけでは 1nm 精度で位置決めをすることはできない。なぜなら、交通や波浪等に由来する、数 nm の振幅をもった地盤振動が 1nm 精度のアライメントを阻害するからである。それゆえ、我々はこの地盤振動を打ち消すための振動制御システムを開発した。台座に組み込まれた piezoアクチュエーターを高速で伸縮させることにより、地盤振動による台座の揺れを打ち消すというフィードバックシステムになっている。nm オーダー以上の振幅をもつ振動は 30Hz 以下の周波数帯に限られることが地盤振動の PSD (Power Spectral Density) 測定結果からわかっているため、フィードバックのスピードは 50Hz 前後あれば十分である。台座の変位を静電容量型変位計でモニターし、データ処理を PLC (Programmable Logic Controller) で行った。動作確認をした結果、システムは正常にフィードバックの働きをしているが、システムに信号が入力してからフィードバック電圧が出力されるまでに 20 m s 強の遅れがあり、50Hz でフィードバックを行うにはシステムの反応速度が不足していることがわかった。

# 目次

第1章 序論	3
第2章 ILCの概要	4
2.1 ILC計画	4
2.2 ILCの物理	6
2.2.1 Higgs粒子	6
2.2.2 階層性問題	6
2.2.3 ダークマター	7
2.2.4 標準理論の精密測定	7
2.2.5 大統一理論の構築	7
2.3 ILC加速器	7
2.3.1 主線形加速器	7
2.3.2 粒子源	10
2.3.3 ダンピングリング	13
2.3.4 最終収束系	14
2.3.5 振動制御の必要性	17
第3章 台座	18
3.1 台座の構成	18
3.2 カム部	20
3.3 ピエゾアクチュエーター	22
3.3.1 動作原理	22
3.3.2 特性	25
3.4 ピエゾ部	26
3.5 振動計	28
3.5.1 動作原理	28
3.5.2 仕様	28
3.6 振動	29
3.6.1 振動の諸原因	29
3.6.2 台座の固有振動	29
3.6.3 PSD	29

第 4 章	カム部の測定	31
4.1	カム部の動きの計算	31
4.2	カム部の動きの測定	32
第 5 章	ピエゾ部の測定	35
5.1	静電容量型変位計	35
5.1.1	動作原理	35
5.1.2	特性	37
5.2	アンプ	40
5.3	PLC	42
5.3.1	CPU ユニット	43
5.3.2	ADC ユニット	43
5.3.3	DAC ユニット	43
5.3.4	Ethernet ユニット	44
5.4	ピエゾアクチュエーターによる台の変位	44
5.5	反応速度	44
第 6 章	振動制御システムの構築	47
6.1	振動制御システム	47
6.1.1	動作確認	48
6.1.2	反応速度	49
6.1.3	振動制御テスト	50
第 7 章	まとめと課題	52
7.1	結果	52
7.2	まとめと課題	53
Appendix		55
.1	EPICS	55
.1.1	データ処理の仕組み	56
.1.2	処理速度の限界	57
.1.3	レコード	58
.1.4	シーケンサプログラム	59
.2	計算値テーブル	60
謝辞		67

# 第1章 序論

次世代の大型加速器実験として国際リニアコライダー (ILC) 計画が推進されている。国際リニアコライダーとは重心系エネルギーが 500GeV (第一期) 及び 1TeV (第二期) の  $e^-e^+$  衝突型線形加速器である。この実験では放射光によるエネルギー損失の観点から線形加速器を採用している。その全長は第一期では約 30km、第二期では約 50km である。また、リニアコライダーの最大の目的はヒッグス粒子、超対称性粒子のパラメーターの精密測定である。レプトン同士が衝突するので非常にクリーンな反応を観測できる。 $e^-, e^+$  ビームは超伝導加速空洞で線形加速され、ルミノシティーを高くするために IR (interaction region) で縦方向に数 nm まで絞られる。そのため、IR ではマグネットの位置安定性は 1nm が要求される。このために 1nm レベルの位置調整及び位置安定性を達成するための技術開発を目的として、ILC コンポーネント用の台座が製作された。台座の上に置かれたコンポーネントは、台座に組み込まれた piezo素子の伸縮により精度よくアライメントされる。

一方、交通や波浪等のメカニカルな微振動が 1nm 精度のアライメントを阻害するという問題があり、これを解決することは ILC 計画にとって必要不可欠である。そこで我々は piezo素子を使って、この微振動を打ち消すことを試み、そのためのフィードバックシステムを開発した。台座の最大積載量は約 700kg もあり、コンポーネントの重さに十分耐えられる。また、piezoアクチュエーターとステッピングモーターを組み合わせることにより、台座は位置分解能が 1nm でありながら 4mm の移動範囲をもつ。さらに、piezoアクチュエーターの伸縮を利用して地盤振動に対して 50Hz 程度の高速フィードバックをかけられると期待されている。

第2章では ILC の物理と加速器について述べる。第3章では台座の構成について述べる。台座はカム部と piezo部という2つの部分に分けることができる。第4章ではカム部の動きの計算結果とその測定、第5章では piezo部の動きの測定と piezoアクチュエーターの特性について述べる。具体的には piezoアクチュエーターの反応速度と台の変位に現れるヒステリシスカーブをみる。第6章では振動制御システムの構築について述べる。7章はまとめと課題である。また、Appendix に EPICS の説明を加えた。

## 第2章 ILCの概要

### 2.1 ILC計画

現在建設中の国際高エネルギー実験に CERN の LHC 実験がある。LHC は重心系エネルギー 14TeV の陽子陽子衝突型円形加速器で、ヒッグス粒子、超対称性粒子の探索を主な目的とした加速器実験史上最高エネルギーの実験である。LHC ではハドロン同士の衝突により 14TeV という高エネルギーを実現できるが、ハドロンは内部構造をもっているため衝突時に多種の粒子が生成され、データ解析が難しいという欠点をもっている。そこで、内部構造を持たない電子、陽電子を衝突させて実験しようとしているのが次期国際高エネルギー実験の ILC 計画である。エネルギーの高さよりもデータの質を尊重して、LHC よりも多くの物理情報を得るという方針である。リニアコライダーでは電子あるいは陽電子を加速すると

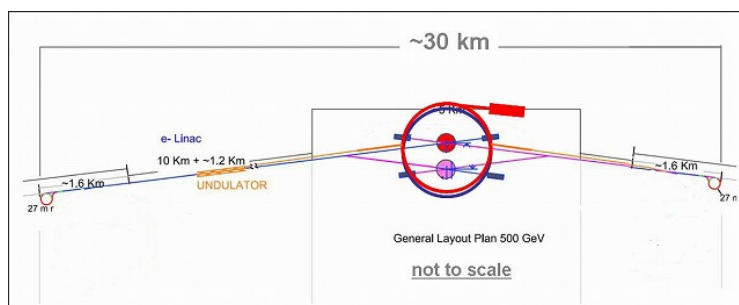


図 2.1: 国際リニアコライダー全体図

きに問題となるシンクロトロン放射を避けるために加速器を直線型にしている。電子ビームが加速器リングを一周する間にシンクロトロン放射で失うエネルギー  $P_\gamma$  は

$$P_\gamma[MW] = 8.86 \times 10^{-2} \frac{E^4[GeV^4]}{\rho[m]} I[A] \quad (2.1)$$

と表される [3]。  $E$  は電子のエネルギー、  $\rho$  は曲率半径、  $I$  はビーム電流である。ビーム軌道が直線、すなわち  $\rho = \infty$  であれば  $P_\gamma = 0$  である。リニアコライダーの全長は第一期では約 30km、第二期では約 50km に及ぶ。超伝導型の加速空洞が採用されていて、第一期で重心系エネルギー 500GeV、第二期で 1TeV まで到達できる。IR ではルミノシティを増すためにビームを縦方向に数 nm まで絞る。表 2.1 にリニアコライダーの主要パラメーターを示し

た [5]。

	第一期	第二期
加速器全長	約 30km	約 50km
電子（陽電子）エネルギー	250GeV	500TeV
x 方向のベータ関数	21mm	30mm
y 方向のベータ関数	400 $\mu$ m	300 $\mu$ m
衝突点でのビームサイズ (x 方向)	655nm	554nm
衝突点でのビームサイズ (y 方向)	5.7nm	3.5nm
ビーム衝突角度	14mrad	14mrad

表 2.1: ILC の主要パラメーター

ILC の特長は信号がクリーンであるだけでなく、衝突エネルギーを広い範囲で連続的に変えることができ、更に偏極ビームを用いることができるため一旦十分な生成事象数を蓄積できればそこから豊富な物理情報を得られるということである。具体的に ILC で観測する物理を次の節で述べる。

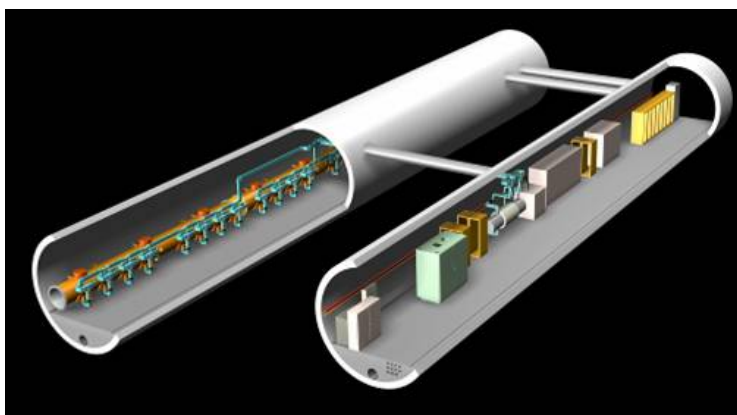


図 2.2: ILC 内部 ©Numasawa

## 2.2 ILCの物理

### 2.2.1 Higgs粒子

ILCではHiggs粒子の

1. スピン及びその他の量子数
2. W,Zへのゲージ結合
3. 湯川結合
4. 自己結合力

を明らかにする。しかもモデルを仮定することなくこれらの性質を調べることができる。スピン及びその他の量子数は、衝突エネルギーを変える、角度分布を測る、ビームの偏極率を変えるなどにより、容易に知ることができる。W,Zへのゲージ結合は生成断面積から直接に1~2%以下の精度で決まる。湯川結合は崩壊比と生成断面積から絶対値を決められる。自己結合力はHiggs粒子が複数同時に生成される現象を観測することで調べることができる [4]。

### 2.2.2 階層性問題

重力相互作用は非常に弱いため、大統一が達成されるのはプランクスケールであろうと考えられている。しかし、標準理論のスケールに比べて17桁も大きなプランクスケールにまで標準理論が適用可能であると仮定するとヒッグス粒子やW粒子がプランクスケール程度の質量をもってしまう。これが階層性問題と呼ばれているものである。ところが、量子効果を考慮に入れると新しい物理のスケールが標準理論のスケールとそれほど変わらないことがわかっており、これが階層性問題を解決するのではないかと期待されている。量子効果を考慮に入れた新しい物理による階層性問題解決の候補として

1. 弱い相互作用を媒介するWやZといったゲージ粒子の質量程度のエネルギーで実現される超対称性による解決
2. 余剰空間次元による解決
3. 「リトルヒッグス」理論による解決

などが挙げられる。いずれにせよ偏極ビームを用いたILC実験による標準理論の精密測定が量子効果を通してより高いエネルギーでの物理現象を捉えることを可能とするため、以上に述べたどの仮説が正しいかを決定する重要な鍵を与える [4]。



### 2.2.3 ダークマター

ダークマターの解釈の一つに、それが弱い相互作用をする新しい安定粒子であるというものがある。天文学での観測によると、そのような粒子の質量は  $100\text{GeV}$  近辺であろうとされており、そうであるならば ILC 実験で生成されることが予想される [4]。

### 2.2.4 標準理論の精密測定

$350\text{GeV}$  付近で衝突エネルギーを変えて測定することでトップクォークの質量を  $100\text{MeV}$  以下の精度で決定する。また、ILC ではゲージボソンの 3 点結合を含む反応過程を数万個観測できる。一方、そのような反応過程は標準理論における高次の量子補正効果から  $0.1\%$  の精度で理解できているので、観測と標準理論とのズレをこの精度で知ることができる。さらに、強い相互作用の結合定数を  $1\%$  以内の精度で測定する。その上、 $Z$  ボソンを大量に生成してワインバーグ角を  $0.001\%$  の精度で決定し、 $W$  ボソンを大量に生成してその質量を  $6\sim 7\text{MeV}$  の精度で決定できる [4]。

### 2.2.5 大統一理論の構築

上記の測定結果から電弱相互作用の対称性の破れのメカニズムと新物理の原理、そしてそのモデルの実験的な同定から上記の実験結果を GUT スケールやプランクスケールにまで外挿することで重力を含めた大統一理論の手がかりをつかむ [4]。

## 2.3 ILC 加速器

### 2.3.1 主線形加速器

ILC では主線形加速器として超伝導型加速空洞を採用する。その主なパラメーターを表 2.2 に示す。図 2.3 は DESY で開発された TESLA 型加速空洞で、ILC 加速空洞のベースラインとなっている。電子、陽電子の加速には電磁波を使っている。クライストロンから空洞へ電磁波が供給され、空洞内に  $TM_{010} - \pi$  モードが立つ。この電磁場と空洞に入射するビームの位相を調節するとビームを加速できる。超伝導空洞で得られる加速電場には理論上の上限がある。それは空洞内につくられる磁場が空洞材料の超伝導臨界磁場に達することによってもたらされる。実際の空洞内には様々な現象が発生し、この理論的限界に到達するのはなかなか難しい。一方、合金や高温超伝導体などのより高い臨界磁場をもつ材料を使えばさらに高い電場が期待できるとして開発研究が続けられているが、均質性、加工性、熱伝導度など問題は多く、現状で最も高い空洞性能が得られる材料として採用されているのがニオブ材である [6]。なお、KEK では TESLA 型空洞よりも高電界を達成できる ICHIRO 空洞の研究も行われている。図 2.4 に ICHIRO 空洞の写真を示す。ICHIRO 空洞は TESLA 型空洞に比べ、各セルの壁がより垂直になっている。

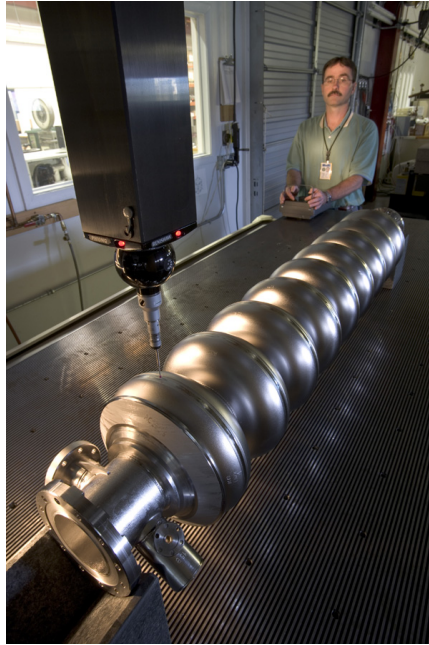


図 2.3: TESLA 型空洞。ニオブ材を使用した9連空洞である。



図 2.4: ICHIRO 空洞。51MV/m を目標としている。

超伝導体	ニオブ
周波数	1.3GHz
セル長	23.06cm
一つの空洞内のセル数	9
空洞全長	1.038m
第一期に ILC にインストールされる空洞数	14000 台
第二期に ILC にインストールされる空洞数	約 30000 台
500GeV 時の運転加速勾配	31.5MV/m
1TeV 増強部分の運転加速勾配	36MV/m

表 2.2: 超伝導加速空洞の主要パラメーター

高電界に上限を与えている主な原因に Field Emission がある。Field Emission とは電場が大きくなると空洞表面から飛び出す電界放出電子の数が指数関数的に増加する現象（トンネル効果）である。これらの電子が空洞内の電場で加速され、空洞内面に当たるとクエンチの原因となる。空洞内面に付着したゴミや突起が Field Emission を引き起こしていることがわかっているので、Field Emission を抑えるには空洞内面にゴミや突起が残らないように、なるべく滑らかに研磨しなければならない。内面を研磨する方法として

1. 遠心バレル研磨
2. 化学研磨
3. 電解研磨

が行われている。最後に超純水で高圧洗浄する。遠心バレル研磨とは図 2.5 に示すような大

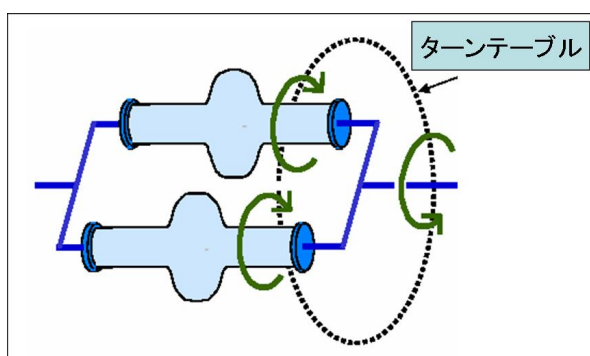


図 2.5: ターンテーブル。2重の回転軸をもつ。

型のターンテーブルに2つの空洞をセットし、空洞内に研磨石と石鹼水を入れて高速で回

転させて内面を研磨する方法である。回転軸を2重にすることにより、空洞の回転とターンテーブルの回転の2つの遠心力が加わり、いままでのバレル研磨に比べて5倍も研磨速度が上がった。化学研磨は空洞内に研磨液（フッ酸（46%）：濃硝酸（60%）：リン酸（85%）=1:1:1(体積比)）を入れて化学反応で内面を溶かして研磨する方法である。仕上げの研磨として電解研磨が行われる。空洞内を研磨液（ $\text{H}_2\text{SO}_4(>93\%)$ : $\text{HF}(46\%)$ )=10:1）で満たし、空洞の中心軸にカソードを通して、空洞とカソード間に電圧をかけ、電気化学反応により研磨する方法である。この方法では、空洞内面の尖った箇所から溶けていくので、化学研磨よりも滑らかな研磨ができる [14][7]。

### 2.3.2 粒子源

ILC では加速粒子として偏極電子と偏極陽電子を使う。偏極電子は GaAs という半導体結晶に円偏光したレーザー光を照射し、光電効果により発生した電子を DC 電場で引き出すことで得られる。図 2.6(a) にバルク GaAs 結晶のバンド構造を示す。GaAs 結晶は最外殻に角

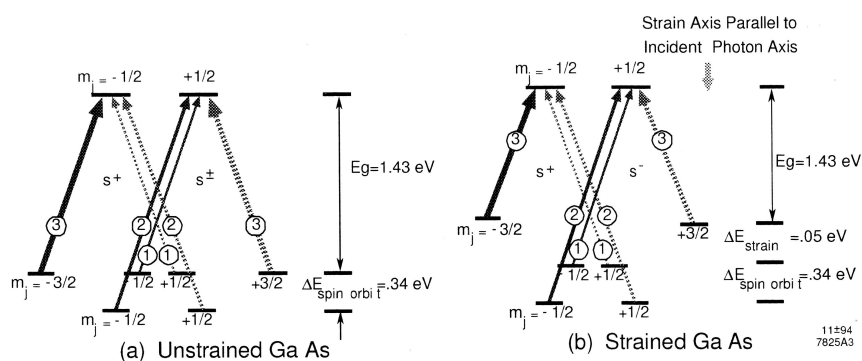


図 2.6: 左が通常バルク GaAs 結晶のバンド構造。右が  $J=3/2$  状態の縮退を解いたバルク GaAs 結晶のバンド構造。

運動量  $3/2$  の荷電帯をもっている。このバンドと伝導体とのエネルギー差に相当する光子により価電子を励起して、ビームとして取り出す。伝導体の自由電子はヘリシティ  $\pm 1$  の状態しかとり得ないために、光子が円偏光していると角運動量保存の法則から遷移が選択的となる。こうして得られる電子の偏極度は 50% である。得られる電子ビームの偏極度は GaAs のスピン-軌道角運動量の合成状態である  $J=3/2$  状態の密度によって決まっている。これは量子力学で決まっているために変更することは不可能である。したがって偏極度 50% は理論的限界値であり、バルク GaAs を使用する限りこれを上回ることは不可能である。50% を超える偏極度は GaAs 結晶の対称性を破り、 $J=3/2$  状態の縮退を解くことによって得られた。SLAC と名古屋大学によって歪み薄膜と超格子薄膜という二つの方法が縮退を解くために開発された。縮退が解けた状態の GaAs 結晶のバンド構造を図 2.6(b) に示す。原理的には

100% 前後の偏極度が可能であり、現実のビームにおいても 90% 前後の偏極度が得られている。現実の伝導帯の準位は真空よりも一般的に低く、伝導帯から真空へ飛び出す確率はとても小さいのだが、偏極 GaAs 陰極の表面は NEA (Negative Electron Affinity) という特殊な表面構造を形成しており、伝導帯よりも真空の準位が低くなっている。そのため、伝導帯に励起された電子の多くが真空中へと出てくることが出来る。NEA 表面という性質は GaAs がもともと持っているものではなく、バルク GaAs 結晶に Cs と酸素を吸着させたある種の電気二重層が作り出すものである。NEA GaAs の量子効率率は 10% 超と驚異的に高いが、NEA 表面は取り扱いが非常に困難で十分な寿命を達成するためには電子銃内を超高真空に保つ必要がある。

陽電子は加速電子をヘリカルアンジュレーターに通し、発生した光子を Ti-6% Al-4% V 標的にあてて作り出す (図 2.7)。ヘリカルアンジュレーターとは放射光を発生するためのコイルのことである。ILC では超伝導コイルを用いる。ビームパイプにコイルを巻きつけて

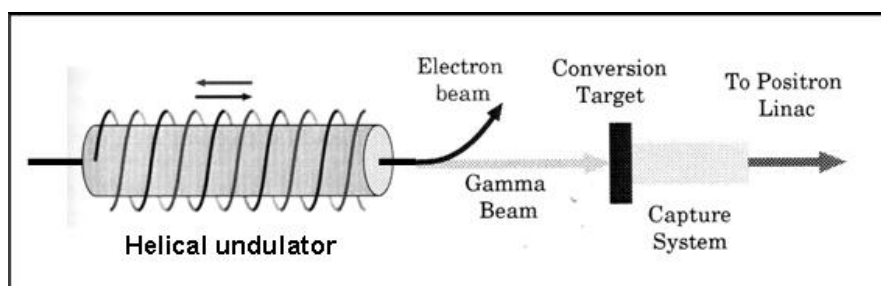


図 2.7: コイルが巻きついている部分がヘリカルアンジュレーターである。発生した  $\gamma$  線を Ti-6% Al-4% V 標的にあてて陽電子を生成する。

パイプ内に磁場を発生させる。このままではソレノイド磁場になるが、同様のコイルを位相を  $180^\circ$  ずらした位置に巻きつけ、2つのコイルが交互に巻きついた状態をつくる。そしてこれらのコイルに逆向きの電流を流すと軸方向の磁場成分は各々のコイルによる寄与がちょうどキャンセルされてゼロになる。横方向の磁場は位相がちょうど  $180^\circ$  ずれていることにより強めあい、周期長  $\lambda_u$  で螺旋に回転する。理想的なヘリカルアンジュレーターの場合、軸上磁場は次のように表される。

$$B_x = B_0 \cos\left(\frac{2\pi s}{\lambda_u}\right) \quad (2.2)$$

$$B_y = B_0 \sin\left(\frac{2\pi s}{\lambda_u}\right) \quad (2.3)$$

ここで x 方向と y 方向で対称な磁場を仮定している。 $\lambda_u$  はアンジュレーターの周期長を cm で表したものである。この磁場に電子を通すと電子は磁場により偏向されるが、その偏向方向が螺旋に変化するため電子も螺旋に運動する。このとき、横方向の電子速度は次のように

変化する。

$$\beta_x = \frac{K}{\gamma} \cos\left(\frac{2\pi s}{\lambda_u}\right) \quad (2.4)$$

$$\beta_y = \frac{K}{\gamma} \sin\left(\frac{2\pi s}{\lambda_u}\right) \quad (2.5)$$

ここで  $K$  は強度パラメーターで、

$$K = \frac{B_0 \lambda_u}{mc 2\pi} \quad (2.6)$$

と与えられる。アンジュレーター内で電子は螺旋運動を行うので、そのコイル軸方向の移動速度は相対論的な電子であっても光速よりも遅くなる。その様子が図 2.8 に示されている。磁場の周期長だけ異なる地点からの放射場の波面はこの効果によりずれることになるが、こ

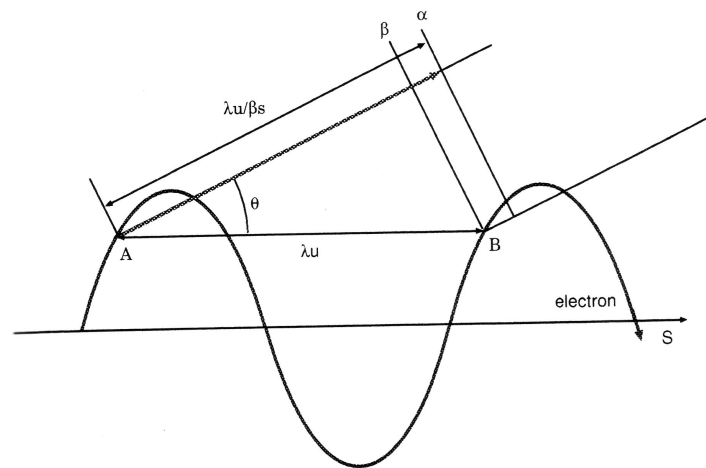


図 2.8: ヘリカルアンジュレーター内では螺旋運動により、s 方向の移動速度は相対論的な電子であっても光速よりも遅くなるため、放射場の波面にずれが生じる。

のずれの大きさが波長の整数倍になっていれば、干渉によりその波長の放射は強められる。したがってアンジュレーターからの光の波長は以下の条件を満たす。

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} (1 + K^2 + \theta^2\gamma^2) \quad (2.7)$$

ここで  $\lambda$  は放射光の波長、 $n$  は調和数であり、波面のずれの長さを波長で量子化した値、 $\theta$  は放射光が観測される角度である。このとき円偏光パラメーター  $P_3$  は

$$P_3 = \frac{2B_0^2}{B_0^2 + B_0^2} = 1 \quad (2.8)$$

となり、円偏光した光子が得られることになる。実際には放射角度にしたがい偏極方向が変化するので、偏光ガンマ線を得るには特定の放射方向、あるいはエネルギーを選択して、特

定の偏光状態のみを選び出す必要がある。また、ヘリカルアンジュレーターから得られるガンマ線のエネルギー  $E_{ph}[eV]$  は次のように表される。

$$E_{ph}[eV] = 9.50 \frac{nE^2[GeV]}{\lambda_u[cm](1 + K^2 + \theta^2\gamma^2)} \quad (2.9)$$

ここで  $E$  は電子エネルギー (GeV)、 $B_0$  は (2.2)、(2.3) 式にあるように最高磁場 [T] である。アンジュレーターによりガンマ線を生成し、そこから陽電子を得るためには、ガンマ線のエネルギーが対生成のしきい値はもちろんのこと、物質中での断面積において対生成が支配的になるエネルギーである必要がある。10MeV を下回るエネルギーにおいてはコンプトン散乱が支配的であるから、ガンマ線のエネルギーは 10MeV あるいはそれ以上でなければならない。ガンマ線のエネルギーが 10MeV となるときの電子ビームのエネルギーは磁場の特性パラメーター  $K = 1$ 、最高磁場  $B_0 = 1.0T$ 、周期長  $\lambda_u = 1.0cm$  とすると一次調和周波数で (2.9) 式より、150GeV である。これは ILC で到達できる電子ビームエネルギーである [8]。

### 2.3.3 ダンピングリング

現在の構想では六角形のリングでアーク部と直線部とからなる (図 2.9)。図 2.1 のように

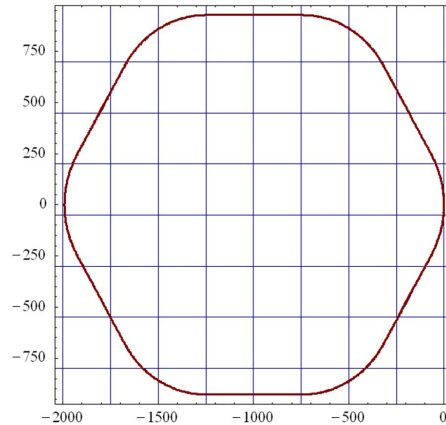


図 2.9: ダンピングリング

IP を中心として電子用、陽電子用各 1 つずつのダンピングリングを建設する予定である。アーク部では TME (Theoretical Minimum Emittance) ラティスを組んでエミッタンスの増大を防ぐ。直線部にはウィグラーがインストールされていて、シンクロトロン放射によりエミッタンスを小さくしている。ダンピングリングの主要パラメーターを表 2.3 に示す [9]。

規格化エミッタンス (水平方向)	$8\mu\text{m}$
規格化エミッタンス (垂直方向)	$0.02\mu\text{m}$
入射から取出しまでの時間	200ms
減衰時間	10ms
バンチ長	6mm

表 2.3: ダンピングリングの主要パラメーター

### 2.3.4 最終収束系

ILCのIRではFinal Doubletにより、縦方向のビームサイズをnmオーダーまで絞ることが要求されている。Final Doubletとは水平垂直双方の焦点をビームの衝突点に合わせるレンズ系のことであり、2つの四極電磁石を使って構成されている。一般に四極電磁石はビームの横方向変位量にlinearに依存する力をビームに与えてビームを中心軸に戻す働きがあるため電子ビームに対してレンズの役割を果たすことになるが、水平方向に収束させると垂直方向は発散してしまい、反対に水平方向に発散させると垂直方向に収束する性質のものである。しかし、このような性質を持つ四極電磁石でも組み合わせ次第では、水平方

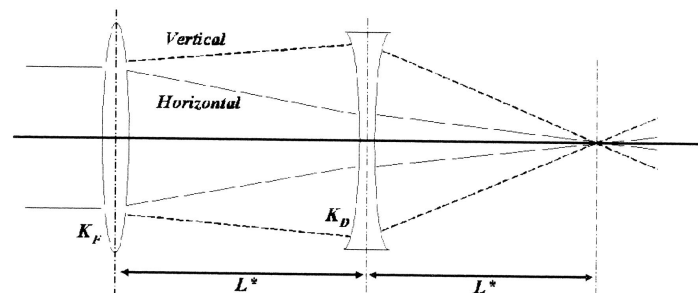


図 2.10: Final Doublet。上流に水平方向に収束する四極電磁石を置き、下流には水平方向が発散する四極電磁石を置く。

向と垂直方向の両方ともに同じ位置で焦点を結ばせることが可能である。図 2.10 に Final Doublet の模式図を示した。ILCではできる限り扁平のビームにするのが望ましいので(表 2.1)、Final Doubletでは垂直方向のビームサイズを水平方向よりも小さく絞りたい。そのためには、上流に水平方向に収束する四極電磁石を置き、下流には水平方向が発散するような四極電磁石を置く。Final Doubletは単なるレンズ系なので、Final Doubletを構成する



四極電磁石の強さで衝突点でのビームサイズが決まるのではなく、

$$\begin{aligned}\sigma_x^* &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1} \frac{\epsilon_x L^*}{\sigma_{xi}} \\ \sigma_y^* &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}+1} \frac{\epsilon_y L^*}{\sigma_{yi}}\end{aligned}\tag{2.10}$$

のように入射ビームの大きさ  $\sigma_{xi}$ 、 $\sigma_{yi}$  を変えることにより、焦点でのビームサイズ  $\sigma_x^*$ 、 $\sigma_y^*$  も決まってくる。ここで、 $L^*$  は図 2.10 のように 2 つの四極電磁石及び焦点間の距離、 $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  はそれぞれ x、y 方向のエミッタンスである。しかし、ただ入射ビームの大きさを大きくするだけでは焦点で小さいビームサイズは得られない。なぜなら、焦点でビームを小さく絞る際にはビーム光学的な収差が発生するからである。このようなビーム光学的な収差のうち代表的なものは色収差である。

色収差の補正には六極電磁石を使うのが一般的である。六極電磁石はビームに働く力がビームの横方向変位量の 2 乗に依存する電磁石で、偏向電磁石での曲げ角、及び四極電磁石での収束力、発散力の運動量依存性を補正するために用いる [12]。しかし、六極電磁石を使うと新たな収差を生じる。

1. Geometrical Aberration (入射位置の 2 乗が影響する収差)
2. エネルギーの拡がりの 2 乗が影響する収差

の 2 つである。ILC のように非常に小さいサイズまでビームを絞り込む際には、六極電磁石などの非線形の電磁石を使わなければならないので、Geometrical Aberration や 2 次のエネルギーの拡がりを補正することを考える必要がある。そのための対策として現在の ILC の最終収束系の設計では、Local Chromaticity Correction を基調とした最終収束ビーム光学系が主流となっている。Local Chromaticity Correction とは、図 2.11 のように、大きな

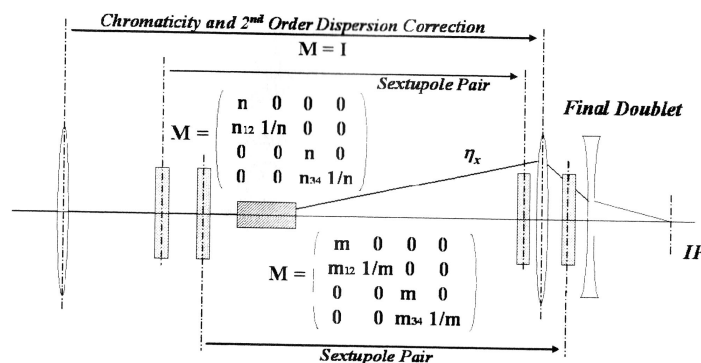


図 2.11: Local Chromaticity Correction

色収差を生み出す原因となる Final Doublet の付近に六極電磁石を置くことによって、その

主要な色収差源である Final Doublet の収差を出来る限り局所的に抑える方法である。しかし、ただ六極電磁石を Final Doublet の側に置いたのでは前述のように色収差を抑えられる代わりに、大きな Geometrical Aberration や 2 次のエネルギー拡がりの効果といった新たな収差を生んで、結果的に衝突点でのビームサイズを小さくすることは出来ない。しかし、Geometrical Aberration の効果は、

$$K_{s1} = -m^3 K_{s2} \quad (2.11)$$

という強さをもった 2 つの六極電磁石を組にして使うことで補正できる。 $K_{s1}$ 、 $K_{s2}$  はそれぞれ 2 つの六極電磁石の強さ、 $m$  は図 2.11 にあるように六極電磁石対の間の輸送行列の成分値を表している。式 (2.11) の条件は、Local Chromaticity Correction において、六極電磁石が生成する Geometrical Aberration を打ち消すための条件となる。また、2 次のエネルギー拡がりの効果を消すには水平方向の dispersion 関数  $\eta_x = 0$  で Final Doublet から上流に水平方向の Transfer Matrix が I だけ離れたところに Final Doublet と同じ強さの四極電磁石を置き、その強さ  $K$  を

$$K_{s2} = \frac{K}{\eta_x} \quad (2.12)$$

となるように選ばばよい。この四極電磁石を置くことにより、水平方向の色収差も同時に補正される。また、この四極電磁石で垂直方向の色収差を生み出さない為に垂直方向のベータ関数は小さく設定する。さらに、式 (2.12) のときは、垂直方向の色収差も水平方向と同時に補正することができる。この補正方法の大きな利点の一つは、垂直方向に関しては Final Doublet の位置で完全に局所的に色収差を補正することができることである。このような指針の下設計された最終収束ビーム光学系を図 2.12 に示す [10]。

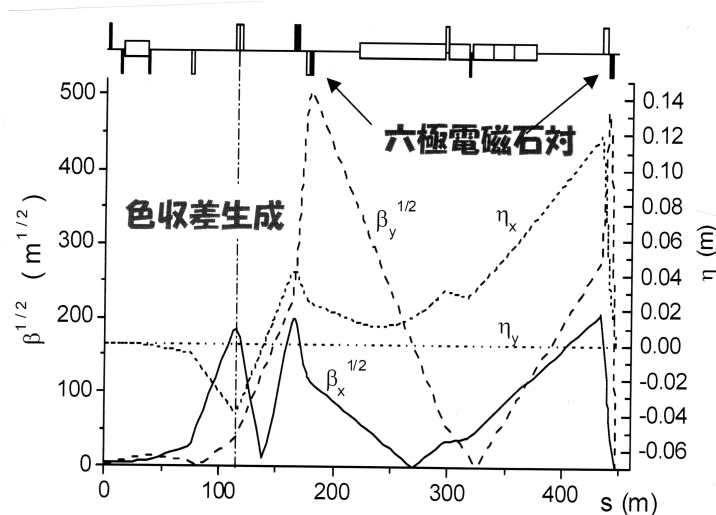


図 2.12: 最終収束ビーム光学系

### 2.3.5 振動制御の必要性

IR ではビームを垂直方向に数 nm にまで絞ることが要求される。ビームの焦点を IP (Interaction Point) に合わせるのは四極電磁石の役割であるから、四極電磁石のアライメントが 1nm 精度でなされていないと、数 nm 径のビームを IP に合わせることができない。地盤振動の振幅は数 nm の大きさをもつので、ビームの焦点を IP に合わせるには、これを打ち消すことが不可欠である。

## 第3章 台座

前節で見たように、最終収束系周辺での四極電磁石のアライメントは非常に重要である。そのため、コンポーネントを 1nm 精度でアライメントするための台座が製作された [11]。6つのピエゾ素子で台座の位置を微調整するつくりになっている。製作元は特許機器株式会社である。この台座により、1nm 精度でコンポーネントの位置を調整できるようになったが、一般に精度の良いアライメントを行なうときに問題となるように、地面の振動によるアライメントの乱れを抑えなければならない。そのために、地面の振動による台の変位をピエゾ素子の伸縮でキャンセルするシステムを構築することにした。私が担当したのはこのシステムの構築である。

以下に、実験で用いた装置について説明する。

### 3.1 台座の構成

台座の仕様を表 3.1 にまとめた。

縦	56cm
横	75cm
素材	SUS303
重量	約 350kg
最大積載量	約 700kg

表 3.1: 台座の仕様。最大積載量が約 700kg なのは、四極電磁石を上に乗せるには台座には最大積載量として 500kg 以上が要求されるためである。また、加工性の良い SUS303 を素材に選んだ。

台座の写真を図 3.1 に示す。図 3.1 にあるように X, Y, V 方向を定義する。X がビームに対して垂直方向、Y がビーム方向、V が鉛直方向である。

台座は2つの部分から成っており、それぞれピエゾ部、カム部と呼ぶことにする(図 3.3)。上部がピエゾ部、下部がカム部である。台座の目的は上に乗せるコンポーネントの位置を 1nm 精度で調整することであり、ピエゾ部がその役割を担う。ピエゾ部の仕様を表 3.2 にまとめた。

ピエゾ部は 1nm 精度で位置調整ができるが、移動範囲が  $0.4\mu\text{m}$  しかない。これでは長期的な地盤変動による位置のずれを補正するには不十分である。そこで、移動範囲を大きくす

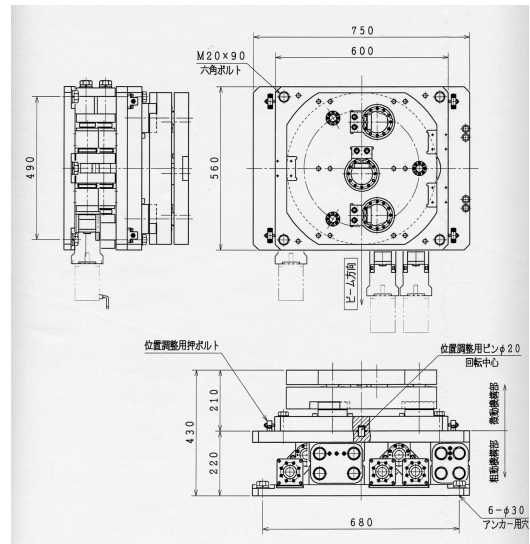
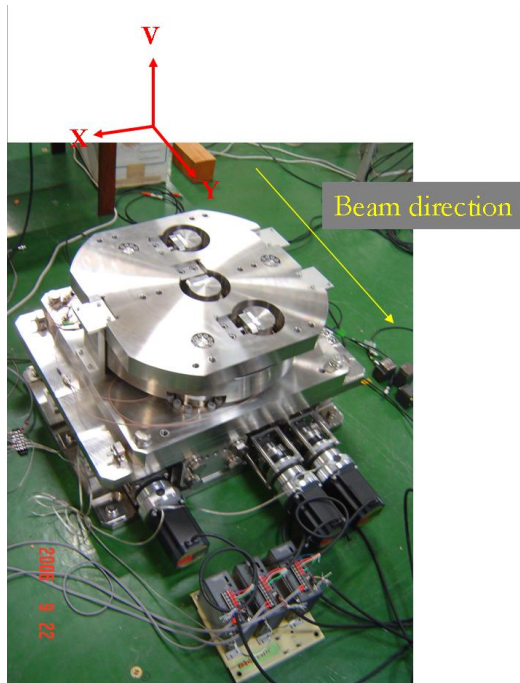


図 3.1: 台座。縦 56cm、横 75cm、素材 SUS303、重量約 350kg、最大積載量約 700kg である。

図 3.2: 台座の構成

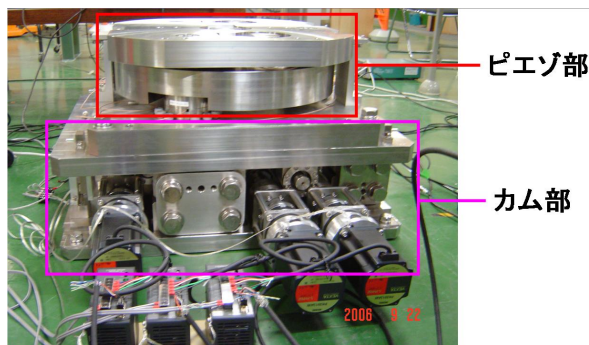


図 3.3: ピエゾ部とカム部。上部がピエゾ部で下部がカム部である。

ピエゾアクチュエーターの数	6
台の可動方向	X, Y, V, $\theta_x, \theta_y, \theta_v$
移動範囲	0.4 $\mu$ m
移動精度	1nm

表 3.2: ピエゾ部の仕様

るためにカム部が取り付けられた。カム部の仕様を表 3.3 にまとめた。カム部によって移動範囲が 4.5mm に広げられた。

ステッピングモーターの数	3
台の可動方向	X, V, $\theta_y$
移動範囲	4.5mm
移動精度	0.1 $\mu$ m

表 3.3: カム部の仕様

## 3.2 カム部

台座の下部をカム部と呼ぶことにする (図 3.3)。カム部はステッピングモーターにより駆動する。ステッピングモーターの仕様を表 3.4 に示す。図 3.3、図 3.5 に示すように、下部プ

ステップ角	0.72°
パルス数/回転	50000
可動方向	右左両回転

表 3.4: ステッピングモーターの仕様

レートに3つのステッピングモーターが取り付けられている。それぞれのモーターにはカム構造をもったシャフトがついている。シャフトの構造を図 3.4 に示す。このシャフトはモーターについている長いシャフトに、短くて太いシャフトを埋め込んだ構造をもっており、長いシャフトの中心軸と短いシャフトの中心軸の間に 1.6mm のオフセットを加えてある。一方、上部プレートにはカム構造をもたない通常のシャフトが2本取り付けられている。この上部プレート側のシャフトと下部プレート側のカムシャフトがアームで連結されて、上部プレートが支えられている (図 3.5)。上部プレート側の片方のシャフトには一つのアームが、もう片方には2つのアームが連結されている。この構造により、3つのモーターの回転が上部プレートを移動させることになる。すなわち、移動できる方向は X, V 方向と Y 軸周りの回転である。

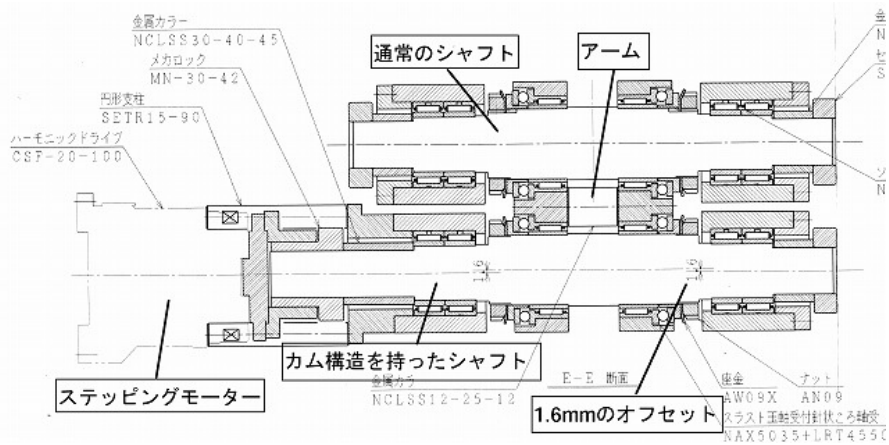


図 3.4: シャフトの構造。モーターについている長いシャフトに、短くて太いシャフトを埋め込んだ構造をもっており、長いシャフトの中心軸と短いシャフトの中心軸の間に 1.6mm のオフセットを加えてある。

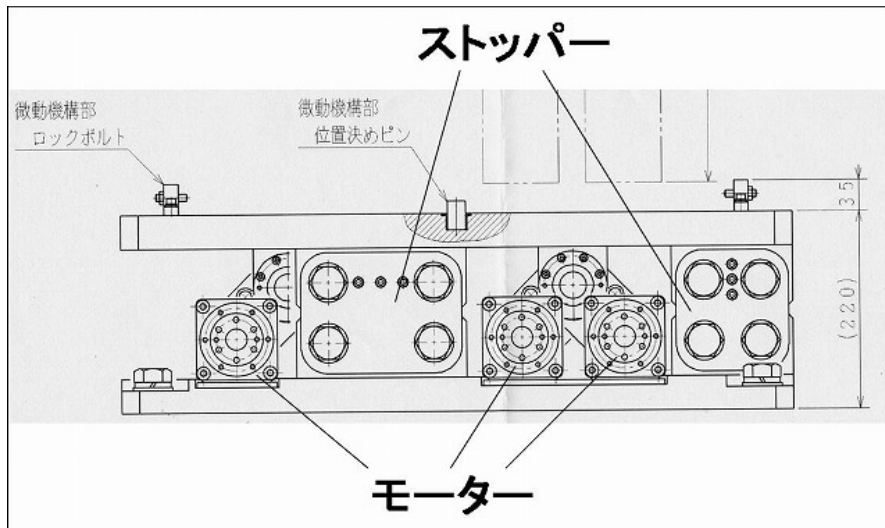


図 3.5: カム部。3つのステップモーターで駆動する。

### 3.3 ピエゾアクチュエーター

本実験で用いた piezo 素子は PZT (チタン酸ジルコン酸鉛) の積層構造よりなっている。図 3.9 に示すように、PZT の層の間にプラス電極、マイナス電極を交互に挟み込んだ構造をしている。



図 3.6: ピエゾアクチュエーター

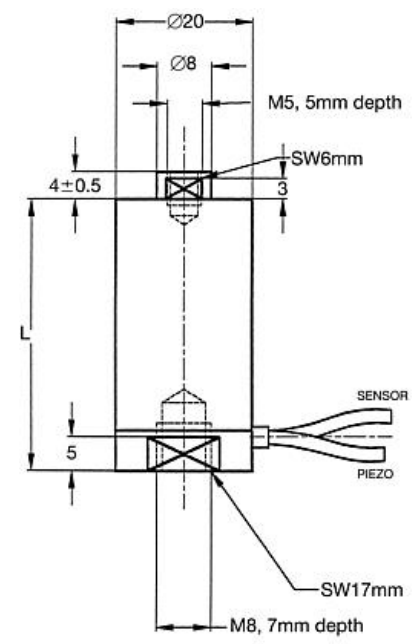


図 3.7: ピエゾアクチュエーターの大きさ

#### 3.3.1 動作原理

##### PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)

本実験で用いた piezo 素子は PZT(チタン酸ジルコン酸鉛) でできている。PZT はペロブスカイト構造と呼ばれる結晶構造をしており、大きな誘電率、圧電性および強誘電性をもつ [16]。ペロブスカイト構造を図 3.8(1) に示す。キュリー温度以下ではこの格子構造に歪みが生じ、PZT は自発的に分極する (図 3.8(2))。

PZT 結晶を拡大して見てみると、一つの方向に分極した領域 (Weiss 領域と呼ばれる) が多数集まって結晶を構成していることがわかる (図 3.10(a) の「分域」が Weiss 領域のことである) [18]。piezo 素子の伸縮の機構は PZT の強誘電性を利用したものである。PZT 結晶に電圧を与えると電気双極子が電場で引き伸ばされて、結晶が伸びる仕組みである。しかし、通常は PZT の Weiss 領域の分極方向は図 3.10(a) に示したようにランダムなので、電圧を与えても結晶は伸張しない。ところが、キュリー温度より少し低い温度で



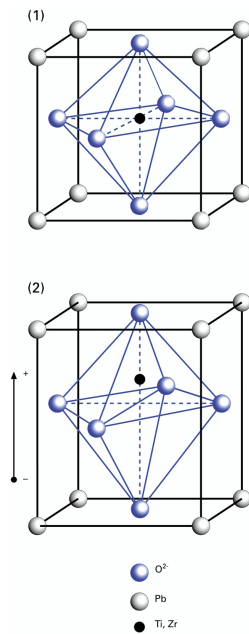


図 3.8: ペロブスカイト構造。キュリー温度以下では格子構造に歪みが生じ、自発的に分極する。

結晶に高電圧を与えると、強誘電性により各 Weiss 領域の分極方向が電圧の方向に揃い、しかも Weiss 領域が大きくなって、結晶全体が分極を示す。電圧を切ったあとも Weiss 領域は大きくなったままである（図 3.10(b)）。この処理により、結晶の分極できる方向がアクチュエーターを伸縮させたい方向だけに制限される。この結晶にプラスの電圧を与えると電気双極子が伸びて結晶全体も伸びる。電圧を小さくすると電気双極子の伸びも小さくなって、結晶が縮む。マイナスの電圧を与えると強誘電性により、Weiss 領域の分極方向が反転してやはり電気双極子が伸びて結晶全体も伸びる（図 3.11）。

本実験ではマイナスの電圧は与えない。与えたとしても結晶が伸びるほど大きな電圧ではない。積層型 piezoelectric actuator には分極処理を経た PZT が組み込まれている。

### 積層型 piezoelectric actuator

実験で用いた piezoelectric actuator は図 3.9 に示すように、PZT の層の間にプラス電極、マイナス電極を交互に挟み込んだ構造をしている。電極に電圧をかけると各層に上向きの電場あるいは下向きの電場が発生する。これらの電場に沿う方向に PZT はあらかじめ分極されているため、PZT 結晶には電場方向に伸びようとする力が働く。この力により PZT の層が伸長する。また、印加電圧を小さくすると層が縮もうとする。積層型の利点は PZT の層を薄くして各層に与える電圧が小さくて済むことと、各層の伸びが加算されて全体とし

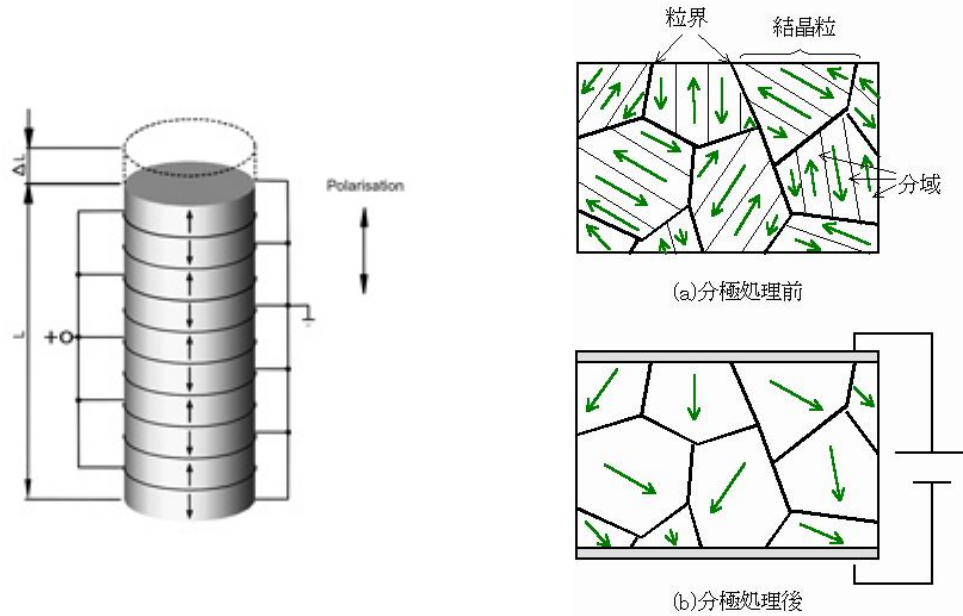


図 3.9: ピエゾアクチュエーターの構造。PZTの層の間にプラス電極、マイナス電極を交互に挟み込んだ構造をしている。

図 3.10: Weiss 領域。分極処理を施すと Weiss 領域が大きくなり、且つ、分極方向がピエゾアクチュエーターの伸縮方向に限られる。

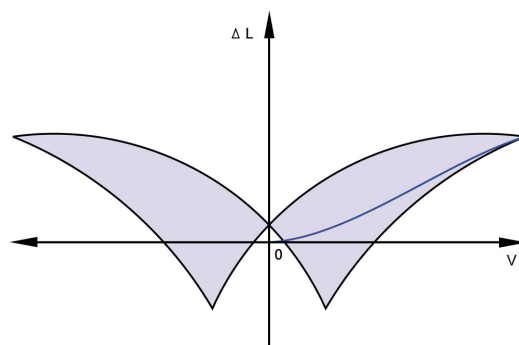


図 3.11: 横軸が印加電圧、縦軸がピエゾの伸びである。ピエゾはプラス電圧でもマイナス電圧でも伸びる。

て大きな伸びになるということである。

### 3.3.2 特性

力

piezoアクチュエーターの最大荷重力、最大発生力はそれぞれ、

1. 最大荷重力：7000N
2. 最大発生力：7000N

である。

ヒステリシス

piezo素子は与える電圧の分解能を上げれば、伸縮の分解能も際限なく上がっていくので、アライメントにとっても適した素子であるが、ヒステリシスをもつのが欠点である。ヒステリシスの概形を図 3.12 に示す [17]。結晶中の分極の向きはすべて一方向に揃っているわけ

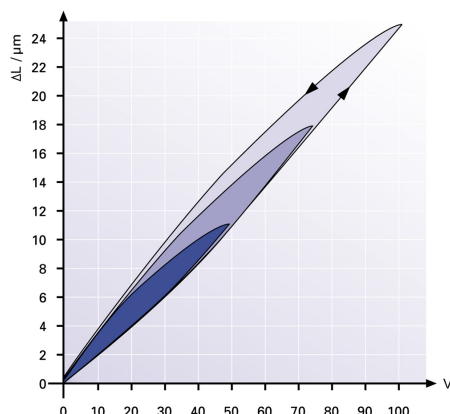


図 3.12: ヒステリシスの概形。横軸が piezo に印加する電圧、縦軸が piezo の伸びである。

ではなく、外因により逆向きのものも含まれる。図 3.12 中の端点に到達するときには電場により逆向きの電気双極子の反転が促進されるので伸び率が大きく、端点から離れるときには電場の影響で反転が起こりづらいため縮み率が小さい。これがヒステリシスの原因である [19]。ヒステリシス曲線の最大幅は最大ストロークの 15% にまで達する。

### 3.4 ピエゾ部

台座の上部をピエゾ部と呼ぶことにする（図 3.3）。ピエゾ部はピエゾアクチュエーターで駆動する。ピエゾ部の構成を図 3.14 に示す。ピエゾ部は A 部と B 部の 2 つに分けられる（図 3.14 下）。A 部は V 方向の位置調節をし、B 部は横方向の位置調節をする。図 3.14 の a,b,c は A 部のピエゾが、d,e,f は B 部のピエゾが組み込まれている位置を表している。図 3.14 の W 線に沿った断面が図 3.13 で、b,c,d のピエゾの様子が描かれている。この図をみてわかるように、それぞれのピエゾにはバネがついている。ピエゾにプラス電圧が与えられるとピエゾが伸びてバネを押し、電圧が小さくなるとピエゾが縮み、バネも元に戻ろうとして台座が動く仕組みである。d ピエゾが伸縮すると台は Y 方向に動き、e,f ピエゾが伸縮すると X 方向に動く。また、e,f ピエゾが互いに異なった大きさの伸縮をすると台は V 軸周りの回転をする。a,b,c ピエゾは台を V 方向に動かすのはもちろん、それぞれの伸び加減を調節することで台に X 軸、Y 軸周りの回転を与えることができる。

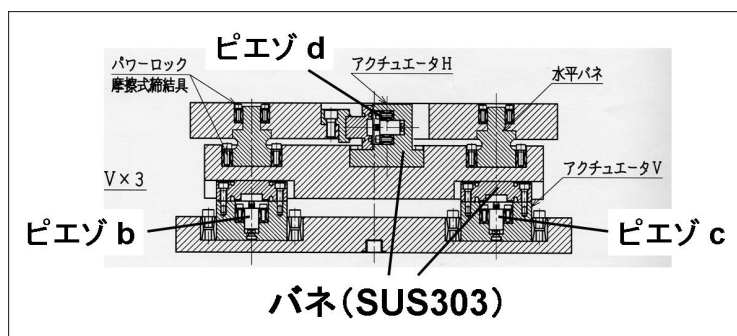


図 3.13: ピエゾ部断面

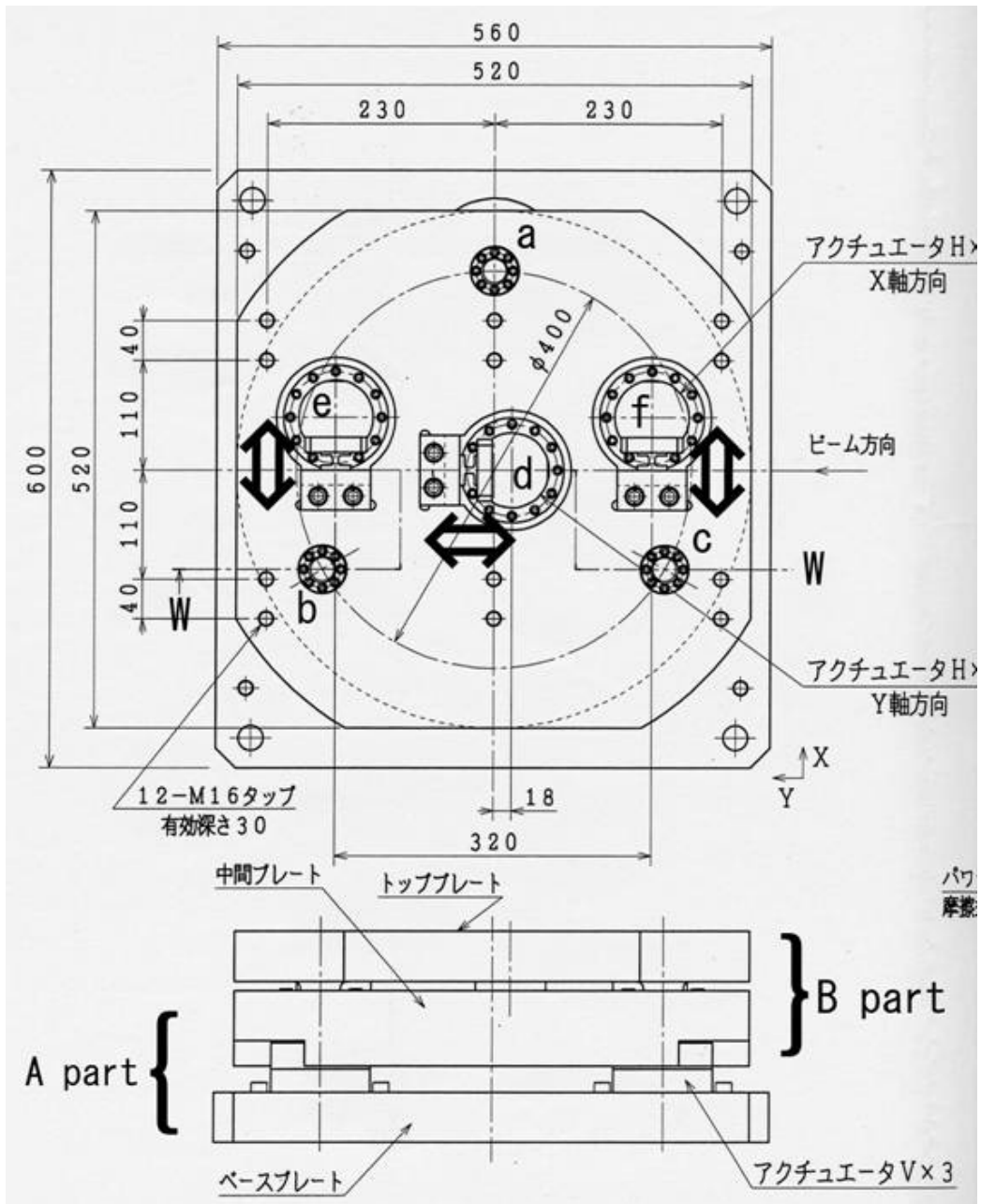


図 3.14: ピエゾ部

### 3.5 振動計

床の振動と台の振動を測定するために、特許機器の MG-102S を用いた ( 図 3.15 )。



図 3.15: 振動計 (MG-102S)

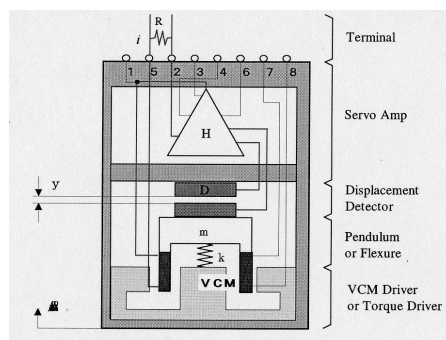


図 3.16: 振動計 (MG-102S) の構造

#### 3.5.1 動作原理

振動計の構造を図 3.16 に示す。図 3.16 中のバネと平行な方向の振動を測定できる。振動計が振動すると  $y$  が変位する。その変位量が電圧となって、アンプを通り、下部の VCM (ボイスコイルモーター) に与えられることにより  $y$  が元の大きさに戻るというフィードバック回路になっている。アンプから出てきた電圧を読み取れば振動計の加速度を知ることができる。単振動の式

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -kx \quad (3.1)$$

より、加速度の大きさ  $\frac{d^2x}{dt^2}$  が振動の大きさ  $x$  に対応している。

#### 3.5.2 仕様

振動計の仕様を表 3.5 に示す。

最大入力	$\pm 2G$
感度	$0.5102V s^2/m$
DC 分解能	$10^{-6}m/s^2$
周波数範囲	DC ~ 400Hz

表 3.5: 振動計 (MG-102S) の仕様

## 3.6 振動

この節では振動の諸原因と周波数及び振動制御の際に問題となる台座の固有振動について述べる。

### 3.6.1 振動の諸原因

1nm以上の振幅をもつ地盤振動について考えると、約30Hz以下の振動数を持つ振動に限られる。地盤振動には、振動数が大きくなるにしたがって振幅が小さくなるという性質があるからである。30Hz以下の振動の主な原因は道路交通と波浪である。道路交通による振動の振動数は約3Hz、波浪による振動の振動数は約0.2Hzである[1]。これらの振動を打ち消すことが本実験の目的である。

### 3.6.2 台座の固有振動

計算によると、台座の固有振動数は45Hzであるが、これは我々が振動制御を行う30Hzに近い値である。そこで、共振を防ぐためにカム部にストッパーを取り付けることにした。図3.5に示した位置にストッパーを取り付けた。裏側にも同様に取り付けてある。計算によると、ストッパーを付けた場合の台座の固有振動数は84.5Hzであり、共振を防ぐには十分高い値である。

### 3.6.3 PSD

床の振動と台上の振動を測定した。測定結果をPSD (Power Spectral Density) で図3.17と図3.18に示す。図3.17がストッパー無しの場合で、図3.18がストッパーを付けた場合である。図中の赤線が台上の振動、青線が床上の振動を表している。図3.17の左がX方向のPSD、右がV方向のPSDである。同様に、図3.18の左がX方向のPSD、右がV方向のPSDである。図3.17左で30Hz,50Hz,60Hz付近にあるピークが台座の固有振動を表しているのだが、図3.18左ではストッパーを付けた結果、65Hzあるいはそれ以上にシフトしている。同様に、図3.17右で50Hz,60Hz付近にあるピークが図3.18右では100Hz以上にシフトしている。以上より、ストッパーを取り付けたおかげで台座の固有振動数をシフトさせることに成功しているといえる。ストッパー無しの状態で100Hz以上の振動が小さくなっているが、これは台座が比較的柔らかいバネの性質を持っているからだと思われる。また、3Hzに道路交通によるピークがみえる。波浪によるピークはMG-102Sの感度では測定できないほど小さく、図には現れていない。

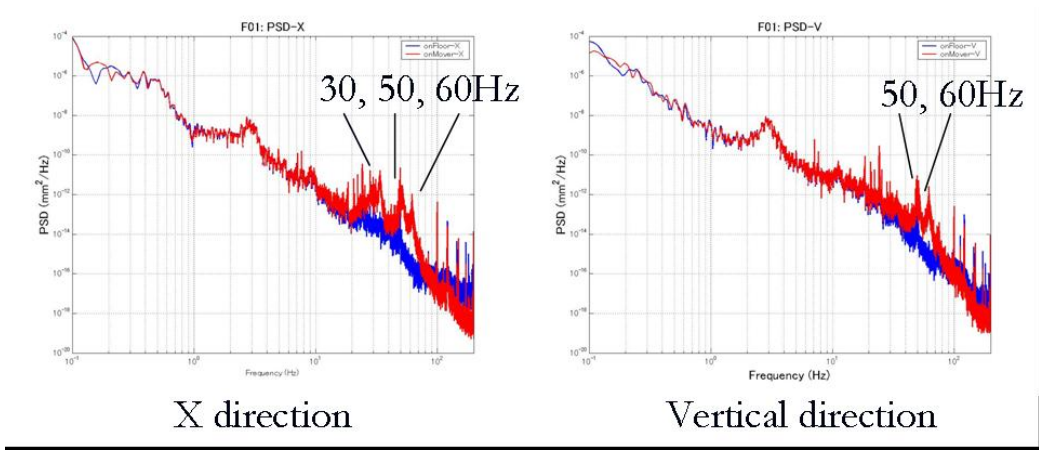


図 3.17: 台座にストッパーを取り付けない場合の PSD

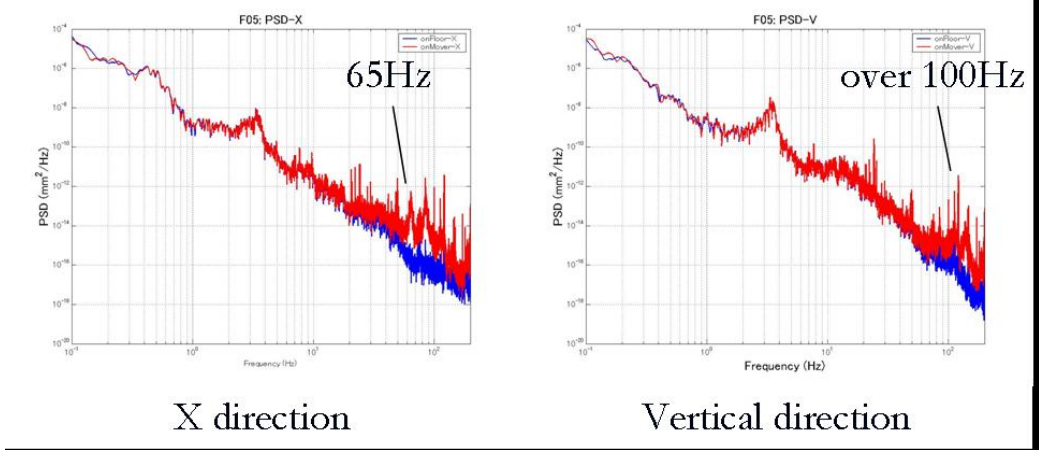


図 3.18: 台座にストッパーを取り付けた場合の PSD。図 3.17 に比べてピークの振動数が大きくなっている。



## 第4章 カム部の測定

カム部は3つのステッピングモーターで駆動する。ステッピングモーターは3つとも独立に駆動できるので台の動きは複雑になる。コンポーネントを載せて振動を制御する際には台を水平にしておきたいので、カム部の動きを調べておく必要がある。設計図を基にしてカム部の動きを計算し、簡単な場合について測定結果と比較して計算結果の正しさを評価した。計算値と測定値を表にして Appendix に付した。

### 4.1 カム部の動きの計算

図 4.1 はカム部を簡略化した図である。 $P_1, P_2$  の動きは以下の連立方程式を解くことで得られる。

$$\begin{cases} (x_1 - r \cos \theta_1 + D)^2 + (y_1 - r \sin \theta_1 - h)^2 = l^2 \\ (x_2 - r \cos \theta_2 - D)^2 + (y_2 - r \sin \theta_2 - h)^2 = l^2 \\ (x_2 - r \cos \theta_3 - D - d)^2 + (y_2 - r \sin \theta_3 - h)^2 = l^2 \\ (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = 4D^2 \end{cases} \quad (4.1)$$

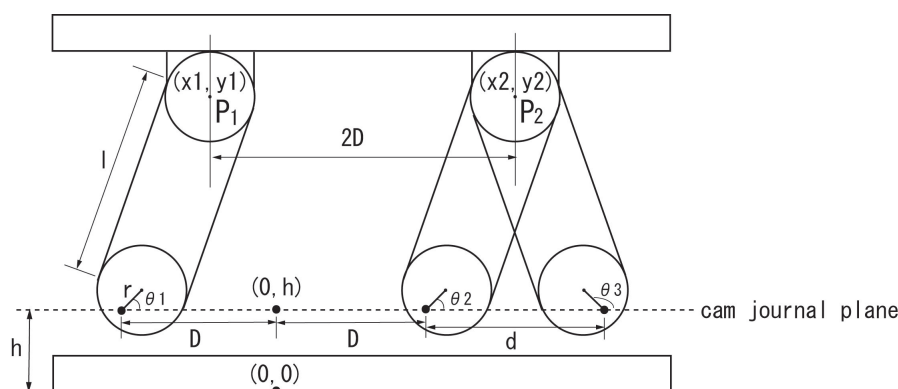


図 4.1: カム部簡略図

ここで、 $(x_1, y_1)$  と  $(x_2, y_2)$  はそれぞれ  $P_1$  と  $P_2$  の座標である。その他のパラメーターの定義を図 4.1 に示した。 $r=1.6\text{mm}$ 、 $l=81.5\text{mm}$ 、 $h=81.13\text{mm}$ 、 $d=115\text{mm}$ 、 $D=158.7\text{mm}$  である。以下の2つの場合についてカムの動きを調べた。

1.  $\theta_1$  を  $0^\circ$  に固定して、 $\theta_2$  を  $0^\circ$  から反時計回り、 $\theta_3$  を  $180^\circ$  から時計回りに同じ速さで回転させた場合。  $P_1, P_2$  の動きの計算結果を図 4.3 に示す。図 4.3 の左図が  $P_1$ 、右図が  $P_2$  の動きを表している。
2.  $\theta_1$  と  $\theta_3$  を  $0^\circ$  に固定し、 $\theta_2$  だけを  $0^\circ$  から反時計回りに回転させた場合。計算結果を図 4.4 に示す。

## 4.2 カム部の動きの測定

また、上記の各場合について、実際にステッピングモーターを駆動させ、図 4.2 のように 2 つのダイヤルゲージを使って台の傾斜を測定した。計算結果から台の傾斜を  $\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$  により算出し、測定結果と比較した。

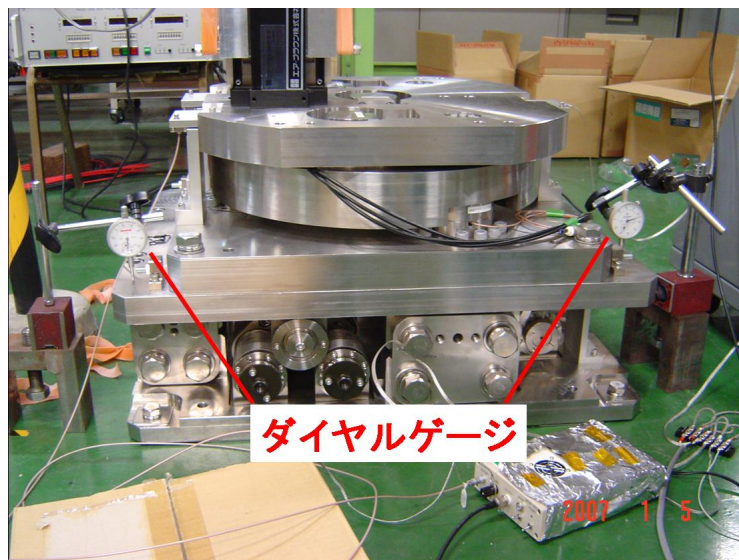


図 4.2: ダイヤルゲージの位置

図 4.5 は測定結果と図 4.3 の計算結果を比較した図で、図 4.6 は図 4.4 の場合の比較結果である。実線が計算結果、“+”印が測定結果を表している。図をみてわかるように、計算結果と測定結果がよく一致している。

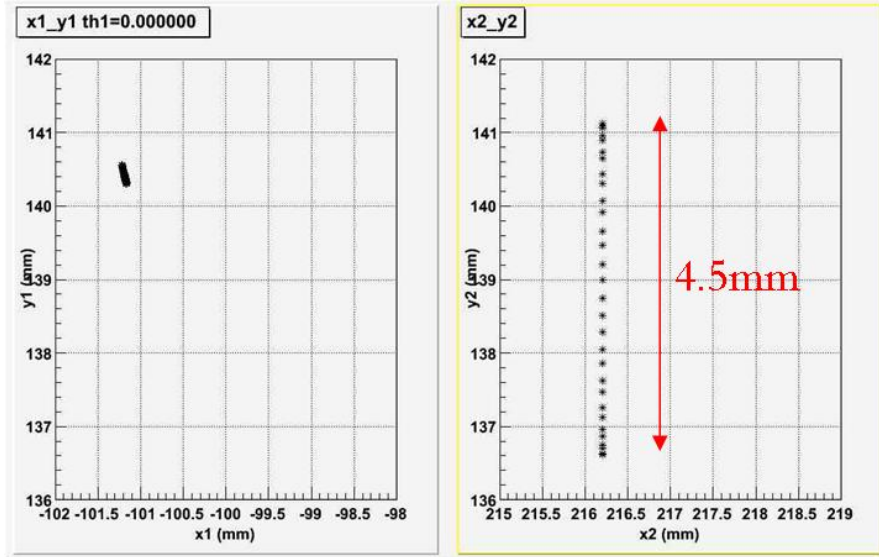


図 4.3:  $\theta_1$  を  $0^\circ$  に固定して、 $\theta_2$  を  $0^\circ$  から反時計回り、 $\theta_3$  を  $180^\circ$  から時計回りに同じ速さで回転させた場合の  $P_1$ 、 $P_2$  の動きの計算結果。左が  $P_1$  の動き、右が  $P_2$  の動きを表している。

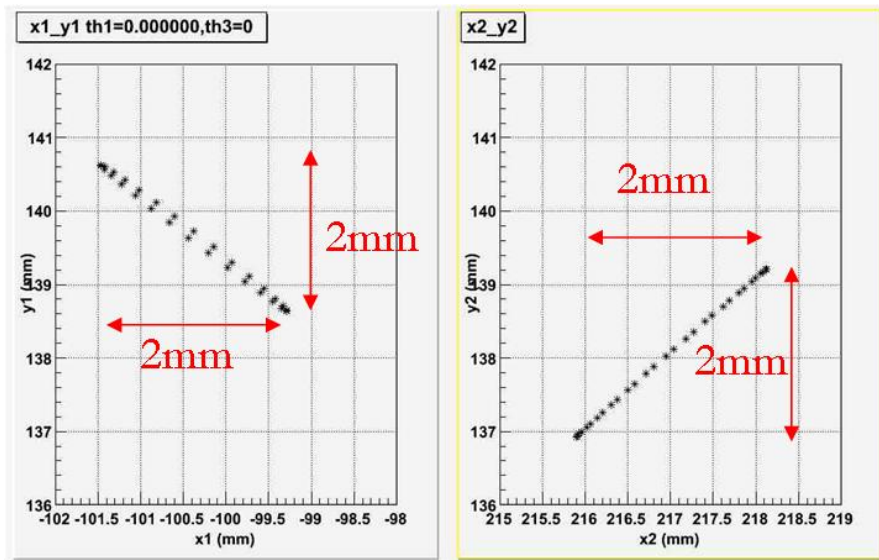


図 4.4:  $\theta_1$  と  $\theta_3$  を  $0^\circ$  に固定し、 $\theta_2$  だけを  $0^\circ$  から反時計回りに回転させた場合の  $P_1$ 、 $P_2$  の動きの計算結果。左が  $P_1$  の動き、右が  $P_2$  の動きを表している。

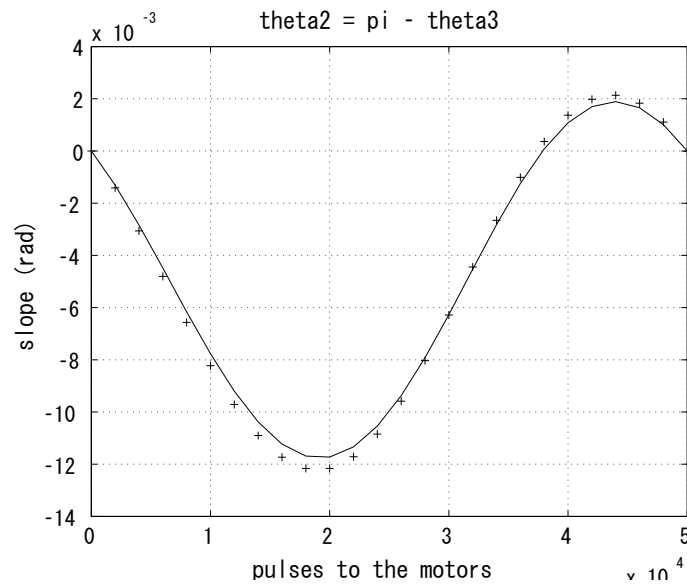


図 4.5:  $\theta_1$  を  $0^\circ$  に固定して、 $\theta_2$  を  $0^\circ$  から反時計回り、 $\theta_3$  を  $180^\circ$  から時計回りに同じ速さで回転させた場合の測定結果と計算結果の比較。" + "印が測定結果、実線が計算結果を表している。横軸はステッピングモーターに与えたパルス数、縦軸は台の傾きを表している。

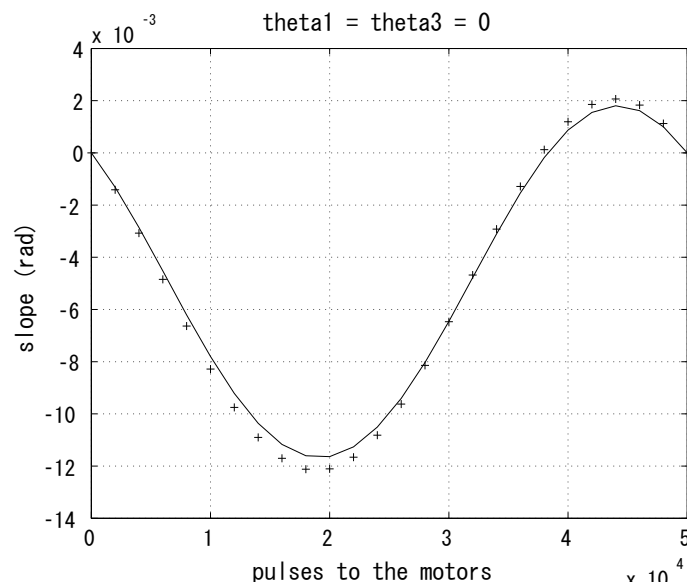


図 4.6:  $\theta_1$  と  $\theta_3$  を  $0^\circ$  に固定し、 $\theta_2$  だけを  $0^\circ$  から反時計回りに回転させた場合の測定結果と計算結果の比較。" + "印が測定結果、実線が計算結果を表している。横軸はステッピングモーターに与えたパルス数、縦軸は台の傾きを表している。

## 第5章 ピエゾ部の測定

ピエゾに電圧を与えたときのピエゾ部の動きを調べた。また、ピエゾが50Hzのフィードバックに対して十分な反応速度をもっているか調べた。

### 5.1 静電容量型変位計

台の変位を測定するためにメステック社の静電容量型変位計(コントローラ:M-2213, センサープローブ:TRA616-100-V1)を使った。コントローラ、センサープローブの写真をそれぞれ図5.1、図5.3に示す。



図 5.1: 静電容量型変位計コントローラ

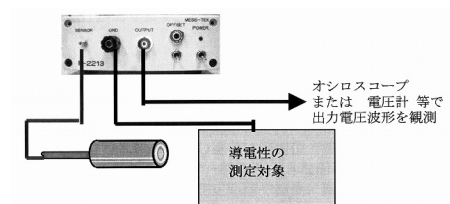


図 5.2: 静電容量型変位計コントローラの前面。測定対象を GND にする。

#### 5.1.1 動作原理

平行板コンデンサの原理によると

$$C = \epsilon \times \frac{A}{D} \quad (5.1)$$

が成り立つ。ここで、 $C$  は静電容量、 $\epsilon$  はセンサー電極とターゲット電極間の誘電率、 $D$  はセンサー電極とターゲット電極間の距離、 $A$  はセンサー電極の面積である。電極間に交流定電流を流すと、交流回路の知識からセンサー電極とターゲット電極間のインピーダンス  $Z$  は、 $Z = \frac{1}{i\omega C} = \frac{D}{i\omega\epsilon A}$  となり、電極間での電圧降下は電極間の距離に比例する [13]。



図 5.3: 静電容量型変位計プローブ

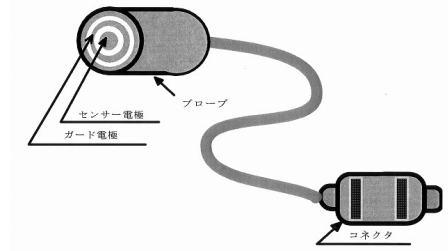


図 5.4: 静電容量型変位計プローブの構造

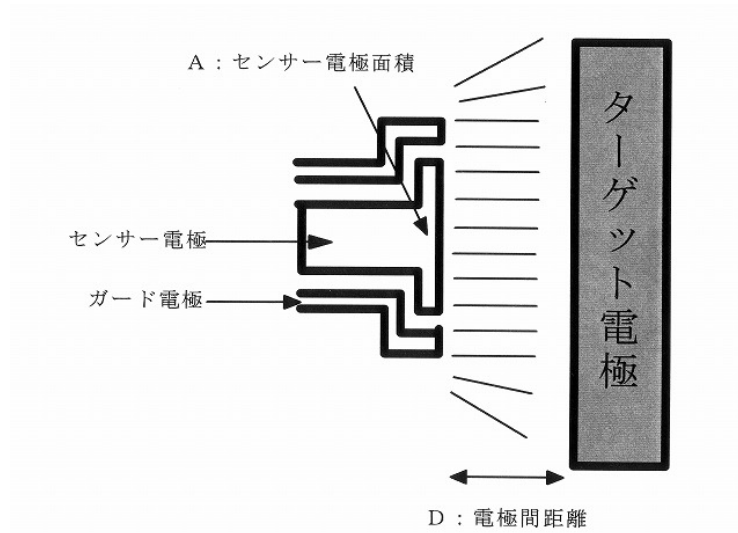


図 5.5: 静電容量型変位計の動作原理。  $C = \epsilon \times \frac{A}{D}$  が成り立つ。

## 5.1.2 特性

### 感度

図 5.6 のようなマイクロメーター付の台を使って 2 つの静電容量型変位計の校正を行なった。対象物とプローブとの距離  $d$  (図 5.7 参照) を変化させて、そのときの変位計からの出力電圧を記録した。図 5.8 と図 5.9 に結果を示す。図 5.8 と 5.9 より、静電容量型変位計の感度は 2 つとも  $10.0\mu\text{m}/\text{V}$  である。図の説明にある 0026、0029 とは各変位計に付けられている番号である。

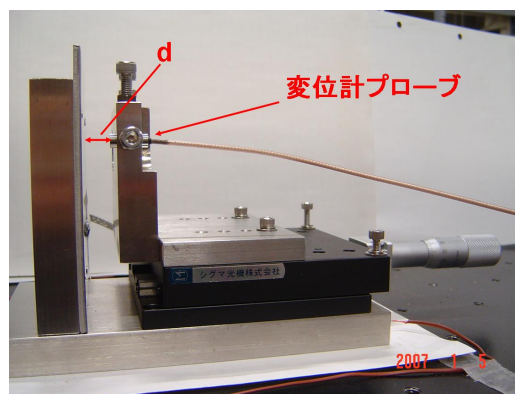
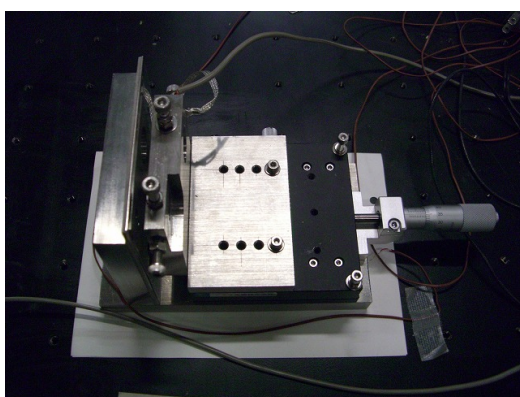


図 5.6: 静電容量型変位計校正用ステージ

図 5.7: 静電容量型変位計校正用ステージ。右に付いているマイクロメーターでステージを左右に動かす。

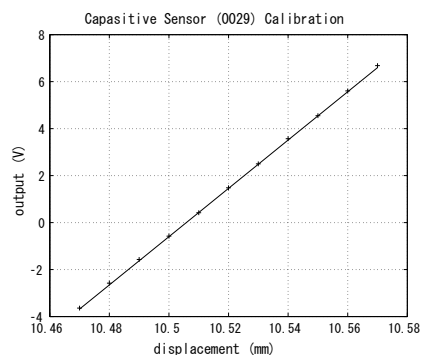
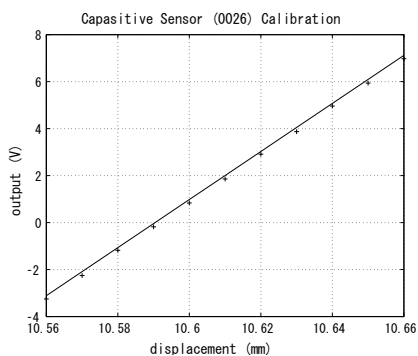


図 5.8: 静電容量型変位計 (0026) 校正結果。感度は  $10\mu\text{m}/\text{V}$  である。

図 5.9: 静電容量型変位計 (0029) 校正結果。感度は  $10\mu\text{m}/\text{V}$  である。

## 測定精度

変位計で台の変位を測定するのだが、変位がある程度大きくないとノイズに埋もれて測定不能になってしまう。変位が測定できるための最小の変位量を調べた。センサープローブを図 5.10 に示す位置に取り付けて、図 5.10 に示したピエゾに数 V かけたときの台の変位を測定した。センサープローブは図 5.11 のように取り付けた。結果を図 5.12 に示す。図 5.12 中の 2 つのステップはどちらもノイズに埋もれずに測定可能な変位である。そのステップは 2mV であり、静電容量型変位計の感度が  $10\mu\text{m}/\text{V}$  であることを用いると、変位計は少なくとも 20nm の測定精度をもつといえる。また、図 5.12 より、ノイズの幅が約 2mV であることが読み取れる。

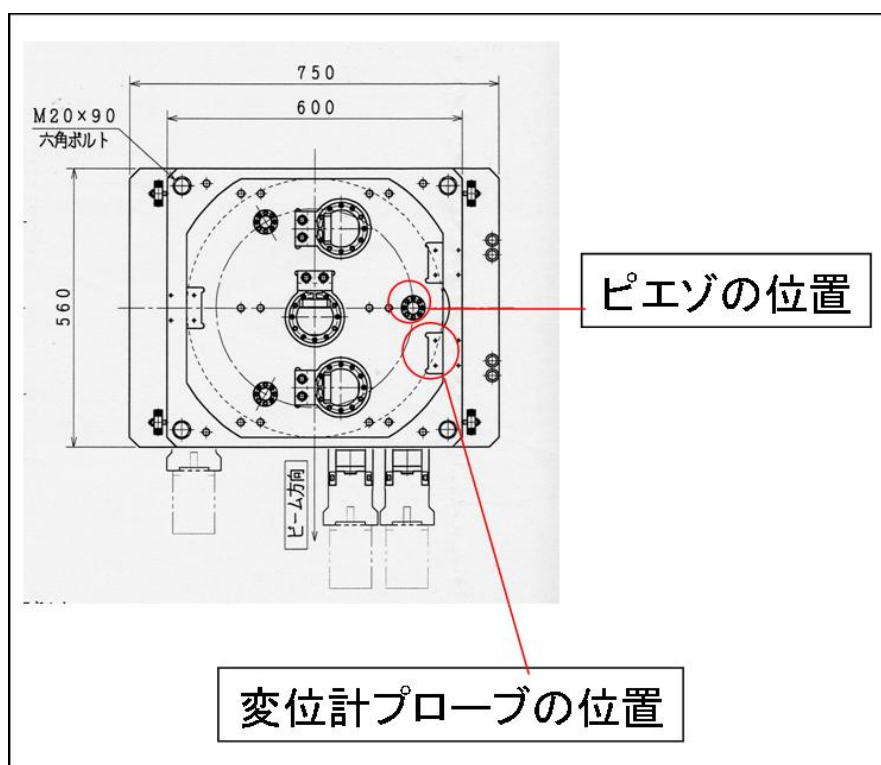


図 5.10: 変位計プローブとピエゾの位置



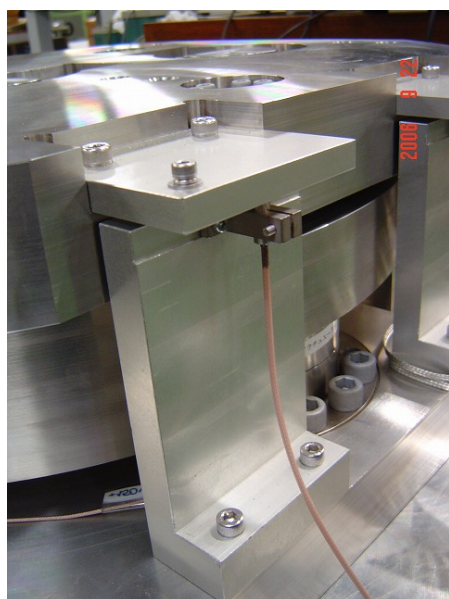


図 5.11: カム部に付いている L 字型の台に変位計プローブを取り付ける。

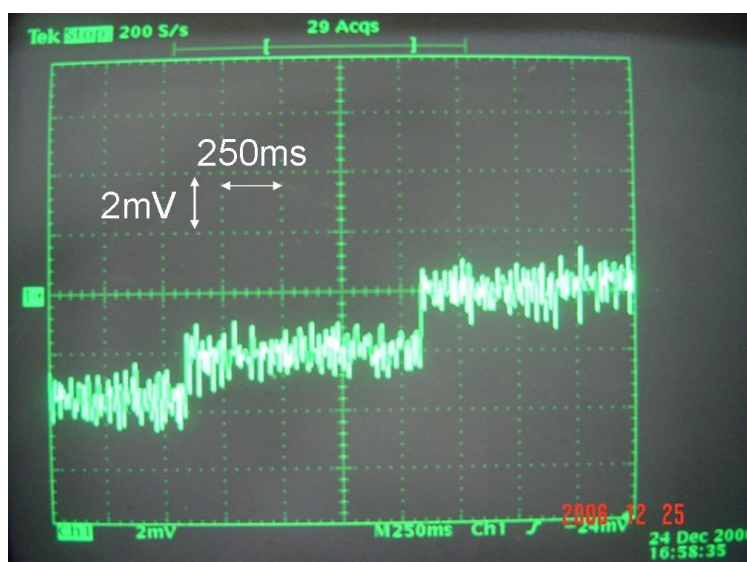


図 5.12: 静電容量型変位計の測定精度。縦軸は  $2\text{mV}/\text{マス}$ 、横軸は  $250\text{ms}/\text{マス}$  である。ノイズの幅は  $2\text{mV}$  程度である。静電容量型変位計の感度は  $10\mu\text{m}/\text{V}$  であるから、図 5.12 のステップの大きさ ( $2\text{mV}$ ) から変位計は少なくとも  $20\text{mm}$  の測定精度をもつことがわかる。

## 5.2 アンプ

DAC からの出力電圧を増幅するために（株）エコー電子製の直流増幅器を使用した（図 5.13）。仕様を表 5.1 に示す。フィードバックに十分な反応速度があるかどうか調べるために図 5.14 に示すようなセットアップでアンプの反応速度を測定した。ファンクションジェ



図 5.13: 電歪素子駆動用電源（直流増幅器）。左端は電圧モニターである。

出力電圧	0 ~ +150V
出力電流	0.1A MAX
バイアス設定範囲	0 ~ +150V
増幅帯域	DC ~ 100KHz
入力電圧	±10V MAX
入力インピーダンス	100KΩ
増幅度	25dB (15 倍)

表 5.1: 電歪素子駆動用電源（直流増幅器）の仕様

ネレーターから 100Hz、0.05V の出力を出し、2 つにスプリットさせて片方をオシロスコープに、もう片方をアンプに通してからオシロスコープに入れた。オシロスコープの表示は図 5.15 のようになった。図 5.15 からアンプの遅れは 1ms 以下である。よって、50Hz のフィードバックに対してはアンプの反応速度は十分である。

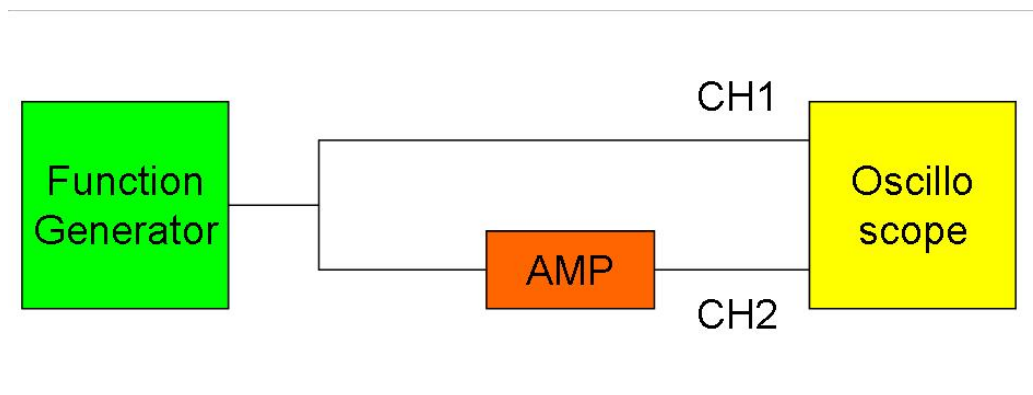


図 5.14: アンプの反応速度を測定するためのセットアップ。ファンクションジェネレーターから 100Hz、0.05V の出力を出し、2 つにスプリットさせて片方をオシロスコープに、もう片方をアンプに通してからオシロスコープに入れた。

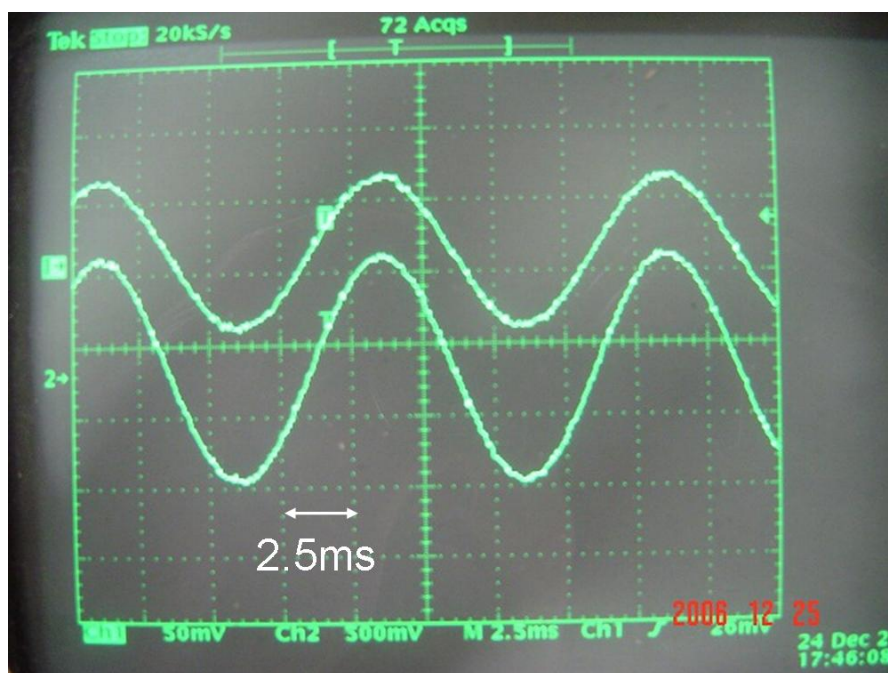


図 5.15: アンプの反応速度。上の曲線が CH1、下の曲線が CH2 である。横軸は 2.5ms/マス、縦軸は CH1 が 50mV/マス、CH2 が 500mV/マスである。アンプに通すことによる電圧供給の遅れは 1ms 以下である。

### 5.3 PLC

フィードバックするためのデバイスとしてPLC (Programmable Logic Controller) を使った (図 5.16)。PLC は CAMAC や VME のような働きをするデバイスで、主に工場で使用されてきた。安価であるという理由から加速器分野では 10 年ほど前から使われていて、今日では加速器分野に広く浸透している。図 5.16 にみえるボードに以下で詳しく説明する各ユニットを差し込んで使用する。PLC はリレー回路から発展してきた制御装置で、(株)三菱



図 5.16: PLC (Programmable Logic Controller)。左から電源ユニット、CPU ユニット、ADC ユニット、DAC ユニット、Ethernet ユニットである。

電機社製 PLC の場合、GX Developer というソフトを使って PLC の CPU にリレー回路図を書き込むと、実際のリレー回路と同様の制御を実現できる。概念図を図 5.17 に示す。

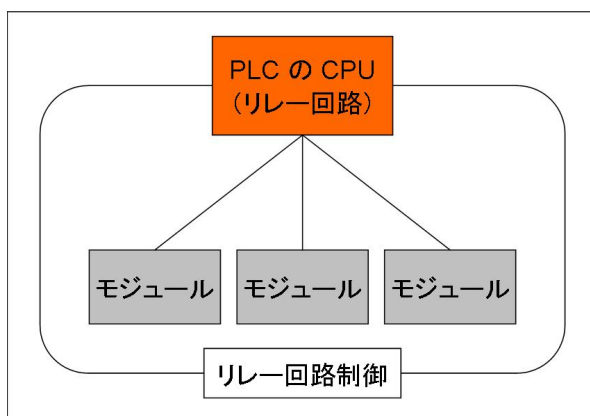


図 5.17: PLC (リレー回路) による制御の概念図。CPU に書き込んだリレー回路図で各モジュールを制御する。

### 5.3.1 CPU ユニット

型名	Q00CPU
処理速度 (シーケンス命令)	LD X0 0.16 $\mu$ s MOV D0 D1 0.56 $\mu$ s

表 5.2: CPU ユニットの仕様

LD X0 とは、PLC モジュールの入力スイッチ X0 が ON になったときの処理 (LD (ロード) 命令) を表し、MOV D0 D1 とは CPU のデータレジスタ D0 に入っているデータをデータレジスタ D1 に移動する命令を表している。いずれも 50Hz のフィードバックにとって十分な速さである。

### 5.3.2 ADC ユニット

型名	Q68ADV
変換速度	80 $\mu$ s/チャンネル
チャンネル数	8
最大分解能	0.625mV

表 5.3: ADC ユニットの仕様

なお、本実験では ADC の機能である温度ドリフト補正を ON にしているため処理時間に 160 $\mu$ s だけ加算される。8 チャンネルすべて使ったとして処理速度を計算してみると

$$80\mu\text{s} \times 8 \text{チャンネル} + 160\mu\text{s} = 800\mu\text{s} \quad (5.2)$$

である。これは 50Hz のフィードバックにとって十分な速さである。

### 5.3.3 DAC ユニット

型名	Q68DAV
変換速度	80 $\mu$ s/チャンネル
チャンネル数	8
最大分解能	0.625mV

表 5.4: DAC ユニットの仕様

8チャンネルすべて使った場合の反応速度は

$$80\mu s \times 8 \text{チャンネル} = 640\mu s \quad (5.3)$$

である。これは50Hzのフィードバックにとって十分な速さである。また、絶対最大出力電圧は±12Vである。

#### 5.3.4 Ethernet ユニット

型名	QJ71E71-100
通信速度	100Mbps
送受信データ格納用メモリの同時オープン可能数	16 コネクション

表 5.5: Ethernet ユニットの仕様

### 5.4 ピエゾアクチュエーターによる台の変位

図 5.18 に示したセットアップでピエゾによる台の変位を測定した。ピエゾに0~150Vの電圧を与えて台を変位させ、その変位量を静電容量型変位計で読み、データロガーで記録した。結果を図 5.19 に示す。ピエゾの特性であるヒステリシスが現れている。下の線が電圧が上がる時、上の線が電圧が下がる時である。0.4 $\mu$ mの移動範囲をもっており、妥当な結果であるといえる(表 3.2 参照)。

### 5.5 反応速度

ピエゾアクチュエーターと静電容量型変位計を合わせた反応速度を調べた。セットアップを図 5.20 に示した。ファンクションジェネレーターからステップ型の電圧を出力し、それをスプリットさせて片方をオシロスコープのCH1に、もう一方を図 5.20 に示した経路に通してオシロスコープのCH2に接続した。結果を図 5.21 に示す。遅れは約1msである。これは50Hzのフィードバックにとって十分な速さである。

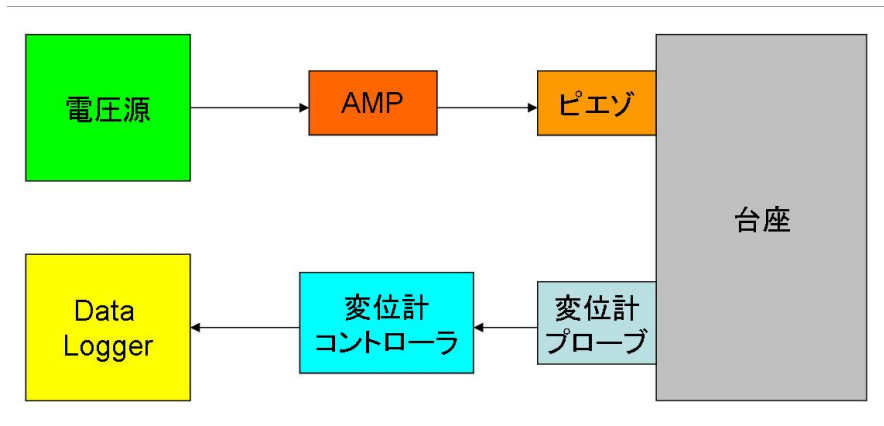


図 5.18: ピエゾによる台座の変位を測定するためのセットアップ。電圧源から 0~150V の電圧を与えて台を変位させ、その変位量を静電容量型変位計で読み、データロガーで記録した。

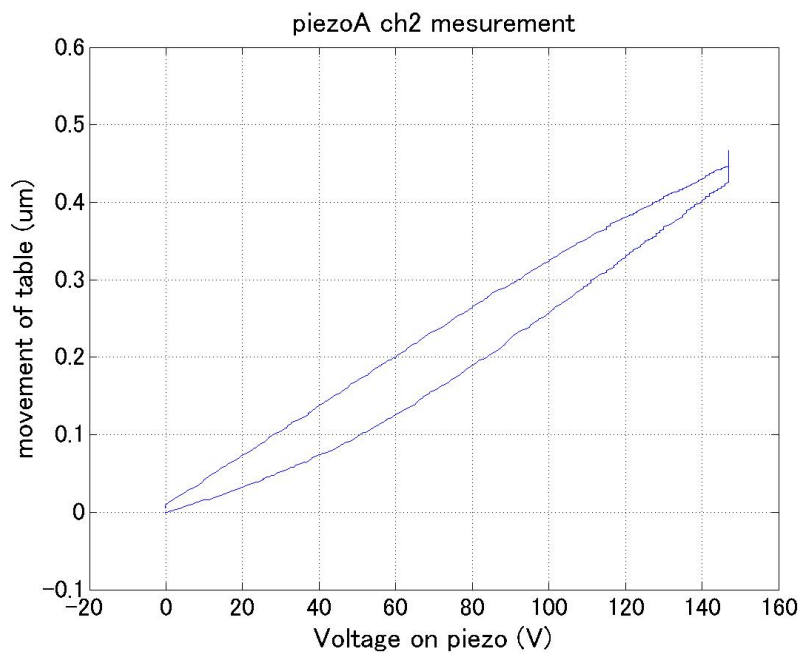


図 5.19: 台の変位。ピエゾの特性のヒステリシスが現れている。下の線が電圧上昇時、上の線が電圧下降時である。

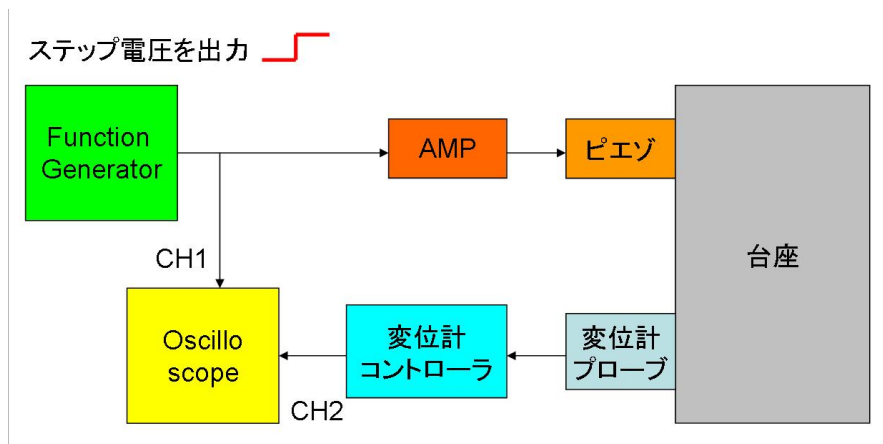


図 5.20: ピエゾアクチュエーターと静電容量型変位計を合わせた反応速度を測定するためのセットアップ

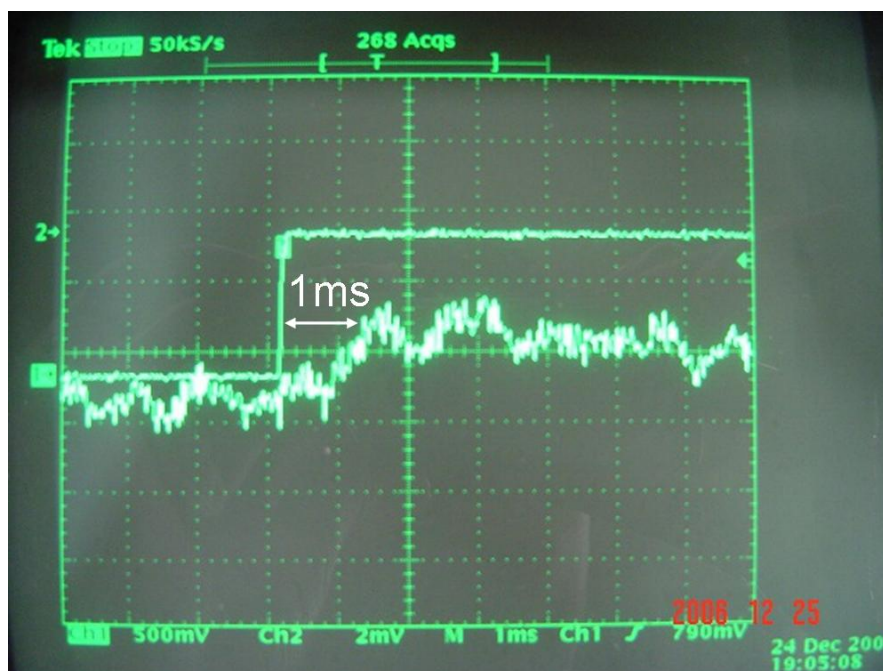


図 5.21: ピエゾアクチュエーターと静電容量型変位計を合わせた反応速度。上が CH1、下が CH2 である。CH1 が立ち上がってから CH2 が立ち上がるまでの遅れは約 1ms である。横軸は 1ms/マス、縦軸は CH1 が 500mV/マス、CH2 が 2mV/マスである。



## 第6章 振動制御システムの構築

### 6.1 振動制御システム

台座の振動を piezoアクチュエーターで打ち消すための振動制御システムを構築した。このシステムは静電容量型変位計で台の変位を測り、piezoアクチュエーターでその変位を打ち消すというフィードバックシステムになっている。システムの概略図を図 6.1 に示した。使用した変位計、piezoの位置は図 6.2 に示した通りである。振動制御用変位計が ADC に接続し、モニタ用変位計がオシロスコープに接続している。まず、変位計で数回読み取った台の変位を平均して、その値を reference とする。その後、reference 値からのずれを一定の周波数で変位計で読み取り、逐次読み取った値から、piezoに与えるべき電圧値を IOC 上で計算し、DAC から即座にその電圧を出力する。その繰り返しでフィードバックする。reference 値は 20Hz で 500 回読み取った変位量を平均した値を使った。また、IOC 上では、 $(DAC \text{ 電圧値}) = (ADC \text{ 入力値}) \times (\text{負の定数})$  という計算をしている。シーケンサプログラムを Appendix に付した。

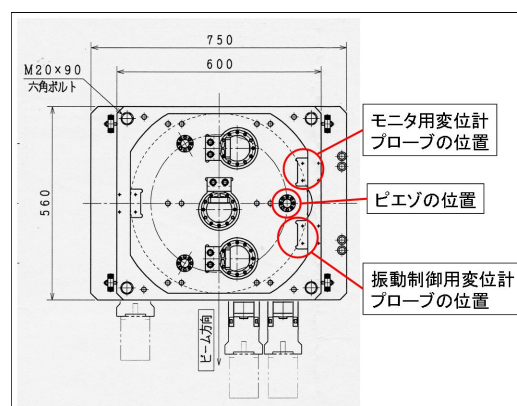
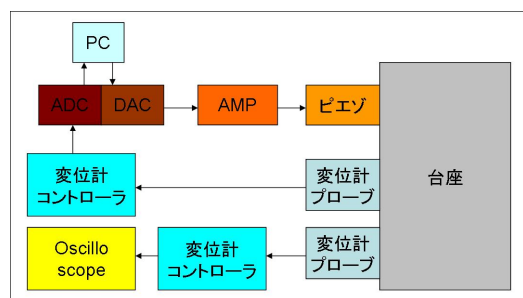


図 6.1: 振動制御システムの概略図。静電容量型変位計を 2 つ用意し、片方をフィードバックに使い、もう一方をモニタ用に使った。

図 6.2: 振動制御に使用する piezo と変位計の位置

### 6.1.1 動作確認

振動制御システムを使ってピエゾを思い通りに動かせるか試してみた。そのためのセットアップを図 6.3 に示す。ファンクションジェネレーターから 1Hz、0.05V のサイン波を出力し、それをスプリットさせて片方をオシロスコープの CH1 に、もう一方をフィードバックシステムに接続した。すなわち、サイン波を ADC に入力し、DAC からはサイン波に対するフィードバック電圧が出力されてアンプを通してピエゾに入力する。そのときの台の変位量を静電容量型変位計で読み、オシロスコープの CH2 に入力した。結果を図 6.4 に示す。入力信号と同様に台の変位もサイン波であり、その振幅の符号が入力信号とは逆になっている。これは、入力信号を打ち消すように台が変位していることを意味しており、フィードバックが正常に働いていることを示している。

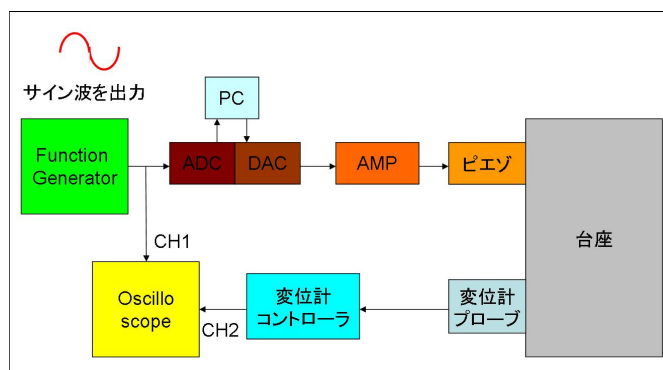


図 6.3: 振動制御システムの動作確認のためのセットアップ

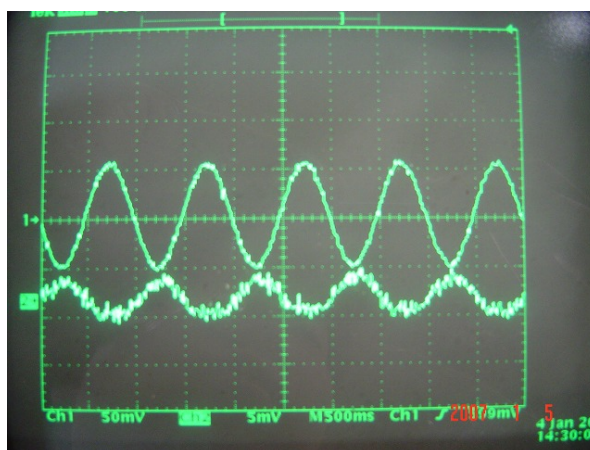


図 6.4: 横軸は 500ms/マス、縦軸は CH1 が 50mV/マス、CH2 が 5mV/マスである。システムは正常に動作している。

### 6.1.2 反応速度

振動制御システムがどのくらいの速さのフィードバックを達成できるかテストした。図 6.5 のようなセットアップでファンクションジェネレーターから 10Hz、0.05V のサイン波を出力し、それをスプリットさせて片方をオシロスコープに、もう一方を ADC に接続した。DAC からはサイン波に対するフィードバック電圧が出力されて、オシロスコープに入る。フィードバック電圧は ADC 入力値に負の定数を掛けた値である。オシロスコープの表示を図 6.6 に示す。上の波がファンクションジェネレーターの出力、下の波が DAC の出力である。横軸の一目盛りが 25ms に相当するので、20ms 強の遅れがあることがわかる。

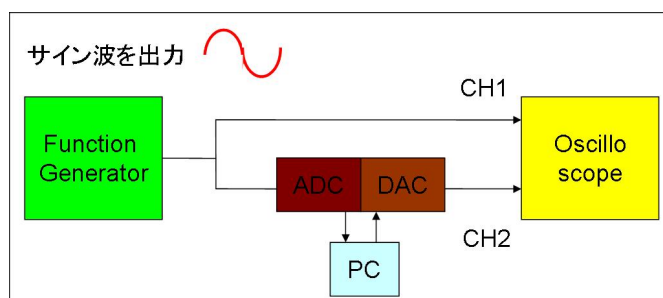


図 6.5: フィードバックの速さを測定するためのセットアップ

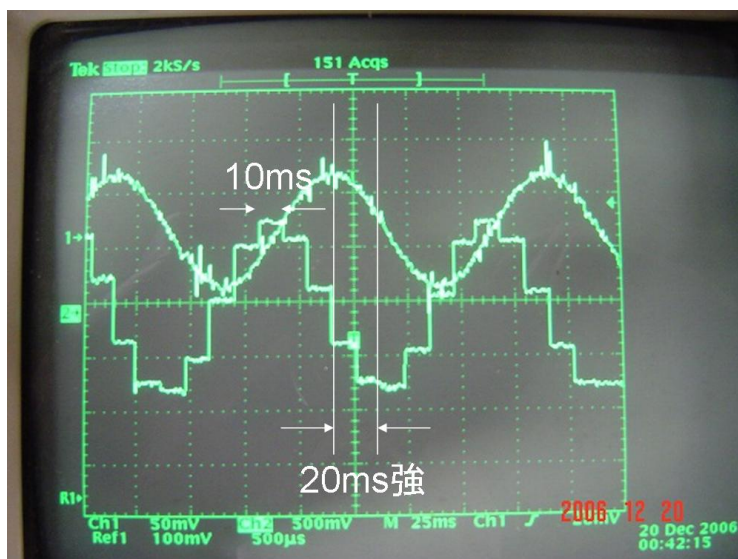


図 6.6: フィードバックの速さ。上が CH1、下の階段状の曲線が CH2 である。フィードバック電圧を出力するまでに 20ms 強の遅れがある。また、ステップ幅が 10ms 強もある。横軸は 25ms/マス、縦軸は CH1 が 50mV/マス、CH2 が 500mV/マスである。

### 6.1.3 振動制御テスト

振動制御の様子がよくわかるように、比較的大きい振動を台に与えるために加振機を使った(図 6.8)。図 6.9 が加振機の構造である。中にコイルが入っており、上部を磁力で引っ張る。コイルが ON のときは上部が下方に向かい、OFF のときは輪ゴムの弾性で上方に向かう。これを繰り返して振動を発生する。図 6.8 のように加振機を台座の上に載せて台座に一定周期の振動を与え、図 6.7 に示した振動制御システムでそれを打ち消した。オシロスコープで振動制御の様子を観察した。結果を次章で示す。

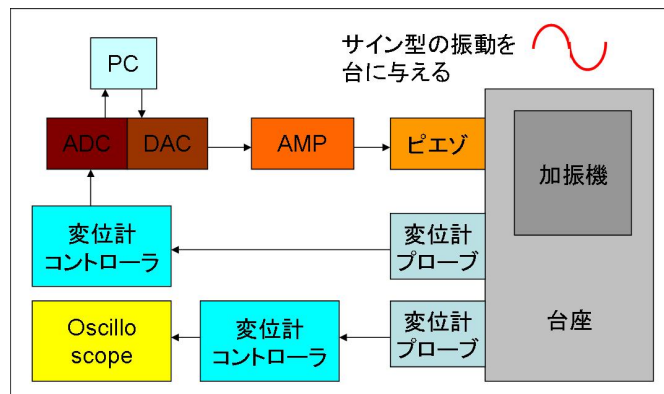


図 6.7: 振動制御システム

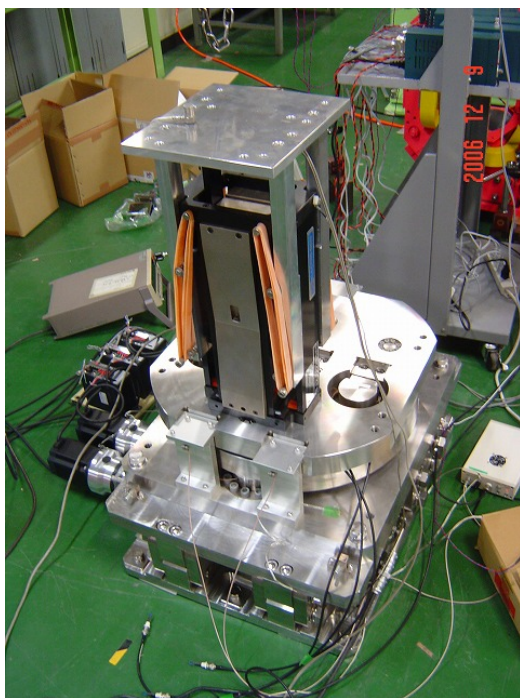


図 6.8: 加振機

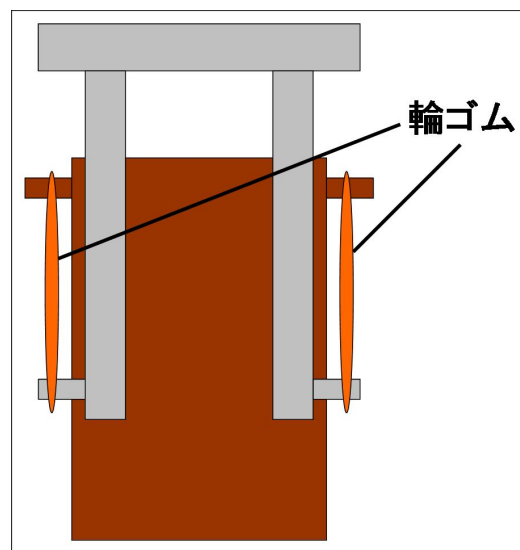


図 6.9: 加振機の構造。中にコイルが入っており、上部を磁力で引っ張る。コイルが ON のときは上部が下方に向かい、OFF のときは輪ゴムの弾性で上方に向かう。これを繰り返して振動を発生する。

## 第7章 まとめと課題

### 7.1 結果

最終目標は 30Hz までの振動制御であるが、フィードバックに 20ms 強かかることを考慮して、まずは遅い振動として 1Hz の振動を台に与えて振動制御してみた。フィードバックに使用した piezo アクチュエーターの位置と静電容量型変位計の位置を図 6.2 に示した。2 つの変位計のうち、一方がモニター用で、オシロスコープに接続し、もう一方がフィードバック用で、ADC に接続している。結果を図 7.1 に示す。図 7.1 はフィードバックをかけている状態からフィードバックを解除した状態に移り変わることを示している。フィードバックがかかっているときの振動幅は 2mV (=20nm)、フィードバック解除時の振動幅は 3mV (=30nm) で、フィードバック中は振動幅が小さくなっているのがわかる。

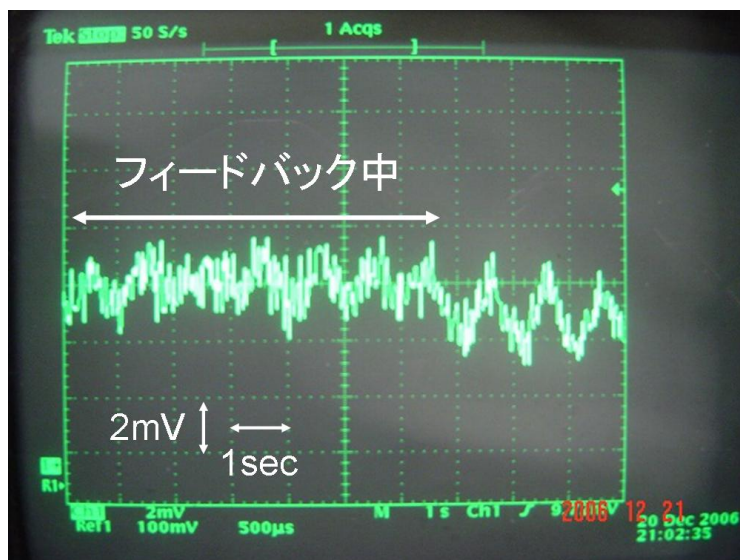


図 7.1: フィードバックをかけている状態からフィードバックを解除した状態に移り変わる場所。フィードバックがかかっているときの振動幅がフィードバック解除時の振動幅よりも小さいのがわかる。

## 7.2 まとめと課題

国際リニアコライダーの IR 付近では電磁石に対して 1nm のアライメント精度が要求される。1nm の精度のアライメントを保持するには地盤振動の影響を打ち消すことが必須となる。そのために piezoアクチュエーターで台座の振動を打ち消すフィードバックシステムを構築した。本実験で使用したデータ処理デバイスとソフトウェアは、

1. PLC
2. EPICS

である。PLC よりも CAMAC を使った方が容易にシステムを構築できるという声もあったのだが、CAMAC 規格は衰退してきており、ILC 実機でフィードバックに CAMAC を使うことはあり得ないという予見から、PLC を選択することになった。また、ノート PC 上でフィードバック電圧を計算するために、PLC とノート PC の間でデータ通信をする必要が生じて、そのためのツールとして EPICS を導入した。本実験での EPICS の構成は通常の EPICS の構成とは異なり、IOC を計算機上に載せた。振動制御に必要なフィードバック速度は 50Hz 程度であり、これは EPICS-計算機間の通信プロトコルである CA プロトコルの通信速度よりも速い。そこで、IOC と PLC 間だけで通信を閉じてしまうことにした。こうして、PLC 及び EPICS を用いてフィードバックによる振動制御システムを構築するに至った。

しかし現状でフィードバックを確認したのは台座に加えた振動が 1Hz の場合のみである。なぜなら、1Hz 以上の振動をフィードバックしようとする piezoアクチュエーター用アンプのプロテクタが作動し、piezoへの電圧の供給が止まってしまうからである。また、同じ 1Hz のフィードバックにしても、もっと大きな振幅の振動をフィードバックできればノイズを気にせずにフィードバックの確認ができるのだが、この場合もアンプのプロテクタが働き、piezoへの電圧の供給が止まってしまう。とにかく、1Hz でフィードバックした結果、振動に比してノイズが大きいという問題はあるけれども 3mV (=30nm) の振動幅が 2mV (=20nm) になるのが確認できた (図 7.1)。このことから、システムは正常に働いているといえる。

さらにフィードバックの効率をよくする、あるいはより速い周波数の振動に対してフィードバックをかけるには、前述のプロテクタの問題を解決しなければならない。解決法としてフィードバックのサイクルをもっと速くすることを考えている。図 6.6 で見たようにフィードバック電圧のステップ幅が約 10ms もある。これが各ステップ間の電位差を大きくして、電圧の急激な変化がアンプに入り、プロテクタが働いているのだと推測している。フィードバックのサイクルを速くできれば、すなわち、フィードバック電圧の各ステップ幅を小さくできれば、ステップ間の電圧の変化量が小さくなってプロテクタの作動を抑えられるはずである。もう一つの解決策として業者にアンプの改造を頼むことも考えている。

フィードバックのサイクルを遅くしている原因がどこにあるか考えてみる。5.2 節、5.5 節、6.1.2 節より、各部分の遅れは、

- |                      |        |
|----------------------|--------|
| 1. アンプ               | 1ms 以下 |
| 2. アンプ + piezo + 変位計 | 約 1ms  |

### 3. フィードバックシステム 20ms 強

である。このことから、遅れが生じるのは信号が ADC に入ってから DAC の出力が出るまでの間であるといえる。シーケンサプログラム中でデータ通信命令 (pvPut/pvGet) の数を増やすと、命令 1 つにつき約 5ms 遅れが延びた。つまり、データ通信において遅延が発生していると考えられる。以上より、今後研究を進めるべきは、

- データ通信速度の向上

であろう。その後、

- フィードフォワードシステムの構築
- 6つのアクチュエーターすべてを使えるように改良
- 静電容量型変位計よりも精度の良いレーザー干渉計を使う
- しっかりしたアースを用意する

等を解決すべきである。



# Appendix

## .1 EPICS

図 5.17 に示したように、リレー回路による制御だけで実験を行うことができるのだが、フィードバックのための計算をノート PC 上で行いたいという理由により、EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) を使って PLC を制御することにした。EPICS とは Argonne National Laboratory および Los Alamos National Laboratory によってその開発が始められた加速器や大型測定装置、大型望遠鏡などに使われる分散型制御システムを開発するための、ソフトウェア開発環境と汎用アプリケーションのセットのことである。本実験では PLC とノート PC 間のデータ通信を行うのに EPICS を用いることにした。ここでは EPICS を PLC 制御のために使ったが、他にも VME や CAMAC 等の制御に使うこともできる [2]。図 2 に EPICS の基本構成図を示す。

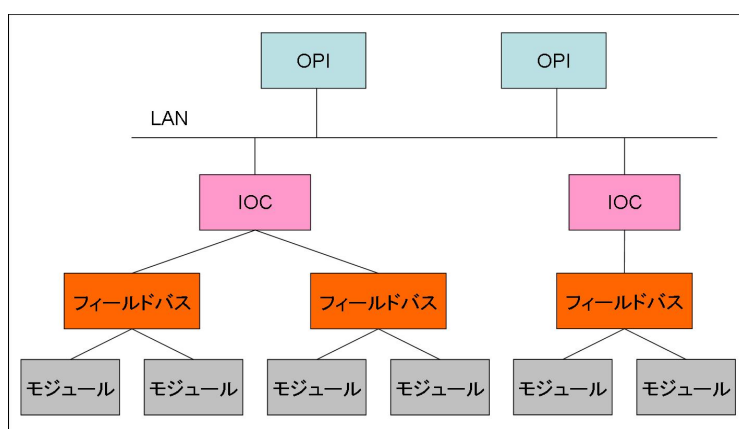


図 2: EPICS の基本構成。OPI はクライアントの端末、IOC はサーバーのようなもの、フィールドバスは PLC や CAMAC 等、モジュールは ADC や DAC 等が該当する。

EPICS はネットワーク分散型アーキテクチャを採用し、

1. ローカルコントローラ層
2. Network 層
3. オペレータアプリケーション層 (Operator Interface; OPI)

から構成される。OPIは通常はクライアントのPCである。ローカルコントローラはIOC coreと呼ばれるソフトウェアを実行し、ハードウェア制御の中心的な役割を果たしている。機器の制御はIOC (Input/Output Controller) から直接あるいはフィールドバス (CAMAC, VME, GPIB, PLC等) を経由して行われる。本実験では各モジュールの制御をPC上のIOCからPLCを経由して行った。IOC上には、EPICS runtime databaseと呼ばれるソフトウェアが導入され、ハードウェアへのアクセスはruntime database経由で行われる。EPICS上でのデータ通信は、Channel Access (CA) プロトコルが使用される。これは、TCP/IP及びUDP/IP上に定義された非同期通信プロトコルであり、EPICS制御システム内のデータへのアクセス方法を提供している。CAプロトコルは各データの読み出し (get) / 書き込み (put) や callback (処理終了通知) が実装されている。さらに、ローカルコントローラ層 (IOC) からオペレータアプリケーション層 (OPI) へのイベント通知を行うためのモニタ機能を持つ。

EPICS上での制御対象機器群は、EPICS runtime database上の複数のレコード集合体として表される。レコードは複数のフィールドから構成される。本実験では各モジュールのチャンネル1つがレコード1つで表される。例えばADCユニットはチャンネル数が8つなので、レコード8つでADCユニット1つが表現される。そして、各チャンネルの細かい設定はフィールドと呼ばれる複数のパラメータで表される。レコードの例を1.4節に付した。また、EPICS上のレコード名は、データベース中で一意なものである。つまり、DACのチャンネルを表すレコード名でもADCのチャンネルを表すレコード名でも拡張子のようなものを付ける必要がなく、勝手な名前を付ければユニットの種類に関係なしに目的のチャンネルにアクセスできる。EPICSは分散データベースであるため、レコードの実態は複数のIOC上に点在している。EPICSクライアント(オペレーションアプリケーション)は、レコードの実態がどのIOC上にあるかを意識する必要はない。システムの拡張や機能・制御対象の追加のため、データベースを複数のIOC上に分散させる場合にも、オペレータアプリケーション側の変更は必要ない。これは、EPICSの高い拡張可能性の一例を示している。

### 1.1 データ処理の仕組み

フィードバックはEPICS及びPLCの組み合わせで行なった。PLCを使った理由として、価格が安いことと加速器分野で広く使われていることが挙げられる。CAMACを使う案もあったが、CAMAC規格はすでに衰退しており、今後実験に使うことは考えられないので、CAMACに代わるものとしてPLCを選択したというのも一つの理由である。使用したPLCモジュールはADC, DAC, Ethernet, CPU, 電源の5つである。一方、EPICSはノートPCにインストールし、IOCをノートPC上に載せた。IOCはサーバーのような役割を果たし、通常はPCとPLCの間に置かれるものだが(VMEをIOCとして使うことが多い) 本実験ではそれをノートPC上に実現した。概念図を図3に示す。図2と見比べると違いがわかる。

EPICSの主要な通信方法はCAプロトコルを使った方法である。これは非常に簡易な命令群を使って、コマンドライン上でcaput, cagetなどの命令を出すだけでデータのやり取りができる。しかし、CAプロトコルの通信速度は最大でも10Hzである。これではフィード

バック速度が 50Hz に達しない。そこで、我々は EPICS の機能の一つであるシーケンサを使うことにした。シーケンサとは (PLC) モジュールに入ってくるデータを逐一モニタするための機能で、IOC 上で動作するものである。IOC-PLC 間の通信は CA プロトコルではないので、10Hz を超えた処理速度を実現できる。何 Hz までの処理を実現できるかは次の節で詳しく述べる。シーケンサは本来モニタのための機能であるが、フィードバック速度を指定したいため本実験ではモニタ機能は使わない。シーケンサプログラムでは、ADC と DAC の処理に関して書いた。1.3 節にプログラムを示す。本実験での EPICS を用いた PC、PLC 間のデータ通信の概念図を図 3 に示した。PLC には、ADC 値を読むためのリレー回路と、出力電圧値を DAC に渡すためのリレー回路だけが書き込まれている。ADC 値を読みという命令 (pvGet) を IOC から PLC に与えると、PLC が ADC 値を読み、それを IOC に渡す。また、電圧を出せという命令 (pvPut) を IOC から PLC に与えると、PLC が IOC から電圧値を受け取り、DAC にその値を渡す。実際のフィードバック制御の仕組みに関しては 6 節に書いた。

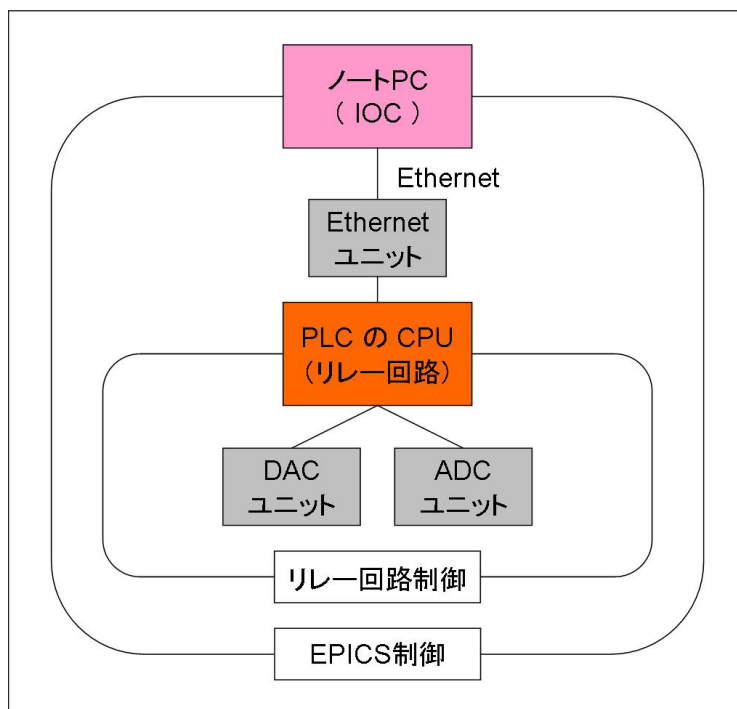


図 3: EPICS による制御の概念図。PC が OPI と IOC 両方の役割を果たす。

## 1.2 処理速度の限界

EPICS 上で CA プロトコルによるデータ通信をすると、通常は最大で 10Hz の処理しかできない。振動制御には 50Hz 程度のフィードバックが必要なので、IOC 上でフィードバック

のための計算をすることにした。なぜなら、CA プロトコルは IOC-OPI 間でのみ使われるので、処理プログラムを IOC 上で走らせれば、データの通信は IOC-PLC 間に限られ、10Hz を超える処理速度を実現できるからである。

具体的に何 Hz までの処理速度を実現できるか調べるために DAC ユニット一つを操作したときの処理速度を測定した。シーケンサプログラムで DAC から任意の周波数で矩形波の電圧を出し、その電圧をオシロスコープで観察した。周波数を小さい値から順に 10Hz ずつ各点で測定した。結果を図 4 に示す。縦軸は 500ms 中の矩形波の数、横軸はプログラムで指定した周波数であり、比例関係が成り立っている周波数帯で正常に動作していることになる。反対に、比例関係が成り立っていない周波数帯では DAC の処理がプログラムの命令にある速度に間に合わずに所々波が欠けた矩形波が DAC から出力されていることになる。図 4 より、PLC の DAC ユニットを用いた場合、100Hz が上限であることが読み取れる。

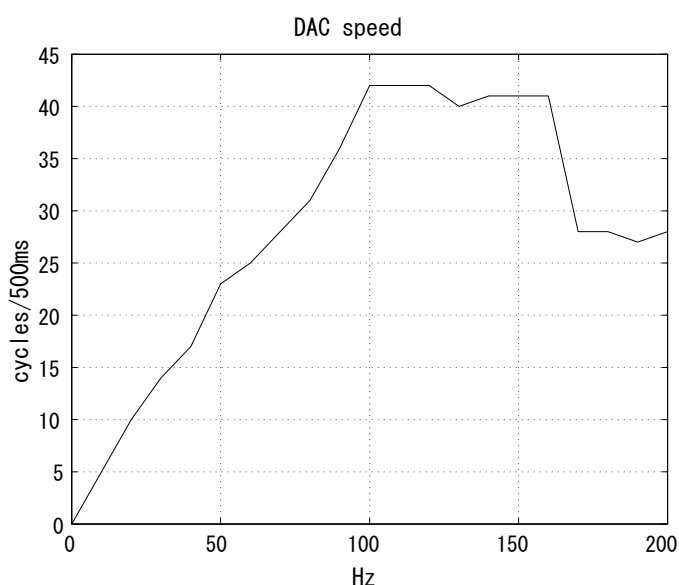


図 4: 500ms 中の周期数の周波数依存性。横軸はプログラムで指定した出力矩形波の周波数、縦軸は 500ms 中に含まれる矩形波の周期数。比例関係が成り立っている周波数帯で正常に動作している。比例関係が成り立っていない周波数帯では DAC の処理がプログラムの命令にある速度に間に合わずに所々波が欠けた矩形波が DAC から出力されていることになる。

### .1.3 レコード

```
record(ai,"MOVERADV: CH.1: VMON") {
  field(SCAN, "$ (scan)")
  field(DTYP, "Mel Plc")
}
```

```

field(FLNK, "0.0000000000000000e+00")
field(INP, "@$(ip)(5000):$(unit)#0x101E&S")
field(PREC, "4")
field(ASLO, "6.2500000e-04")
field(EGU, "volts")
field(HOPR, "10.0000000e+00")
field(LOPR, "-10.0000000e+00")
field(HIHI, "0.0000000e+00")
field(LOLO, "0.0000000e+00")
field(HIGH, "0.0000000e+00")
field(LOW, "0.0000000e+00")
field(HHSV, "MAJOR")
field(LLSV, "MAJOR")
field(HSV, "MINOR")
field(LSV, "MINOR")
}

```

#### .1.4 シーケンサプログラム

```

program FeedBackVertA

double Vref;
double v;
double w;
double sum=0.;
int i=0;
int proc=1;
assign proc to "MOVERADV:CH_1:VMON.PROC";
assign v to "MOVERADV:CH_1:VMON";
assign w to "MOVERDAV:CH_1:VOUT";

ss FeedBackVertA
{
state ss1
{
when(i<500)
{
pvPut(proc);
pvGet(v);
}
}
}

```

```

    sum=sum+v;
    i=i+1;
} state ss2

when(i==500)
{
    Vref=sum/500.;
} state ss3
}

state ss2
{
    when(delay(.05))
    {
    } state ss1
}

state ss3
{
    when(1)
    {
        pvPut(proc);
        pvGet(v);
        w=-(v-Vref)*20.;
        pvPut(w);
    } state ss3
}
}

```

## .2 計算値テーブル

$\theta_1$ (パルス数)	$\theta_2$	$\theta_3$	$x_1$	$y_1$	$x_2$	$y_2$
0	0	-25000	-101.2	140.43801	216.2	140.438084
0	2000	-23000	-101.20467	140.468259	216.2	140.78854
0	4000	-21000	-101.208971	140.496771	216.2	141.021674
0	6000	-19000	-101.212826	140.521713	216.2	141.121542
0	8000	-17000	-101.216046	140.541366	216.2	141.080039
0	10000	-15000	-101.218331	140.554271	216.2	140.897837
0	12000	-13000	-101.2193	140.55937	216.2	140.584799
0	14000	-11000	-101.218576	140.556137	216.2	140.159759
0	16000	-9000	-101.215887	140.544663	216.2	139.64957
0	18000	-7000	-101.211168	140.525676	216.2	139.087411
0	20000	-5000	-101.204629	140.500502	216.2	138.510446
0	22000	-3000	-101.19677	140.470947	216.2	137.957033
0	24000	-1000	-101.18832	140.439128	216.2	137.463765
0	26000	1000	-101.180135	140.407271	216.2	137.062691
0	28000	3000	-101.173049	140.377513	216.2	136.77901
0	30000	5000	-101.167745	140.351734	216.2	136.629491
0	32000	7000	-101.16465	140.331436	216.2	136.621704
0	34000	9000	-101.163892	140.317679	216.2	136.754032
0	36000	11000	-101.165315	140.311076	216.2	137.016317
0	38000	13000	-101.168545	140.311814	216.2	137.390957
0	40000	15000	-101.173081	140.319699	216.2	137.854263
0	42000	17000	-101.178396	140.3342	216.2	138.377961
0	44000	19000	-101.184025	140.354492	216.2	138.93073
0	46000	21000	-101.189621	140.379479	216.2	139.479776
0	48000	23000	-101.194975	140.407828	216.2	139.992434
0	50000	25000	-101.199996	140.437987	216.2	140.437787

表 1:  $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_3 = \pi - \theta_2$  のときのカム部の動きの計算値テーブル。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  の欄は各モーターに与えたパルス数を表している。50000 パルスがシャフト 1 回転に相当する。

計算による台の傾き	測定による台の傾き
2.33144E-07	-1.38504E-05
0.001009062	0.001108033
0.001653712	0.001828255
0.001889744	0.002132964
0.001697057	0.001980609
0.001082376	0.001371191
8.01117E-05	0.000360111
-0.001248755	-0.00101108
-0.002819938	-0.00265928
-0.004531236	-0.004445983
-0.006269776	-0.006288089
-0.007920415	-0.008033241
-0.00937452	-0.009584488
-0.010538089	-0.010844875
-0.011338401	-0.011717452
-0.011728486	-0.012160665
-0.011689178	-0.012160665
-0.011228899	-0.011731302
-0.010381598	-0.010900277
-0.00920336	-0.009709141
-0.007768258	-0.008227147
-0.006163743	-0.006565097
-0.004485928	-0.004806094
-0.002834696	-0.003060942
-0.00130876	-0.001412742
-6.3012E-07	0

表 2:  $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_3 = \pi - \theta_2$  のときの台の傾きの計算値テーブル



$\theta_1$ (パルス数)	$\theta_2$	$\theta_3$	$x_1$	$y_1$	$x_2$	$y_2$
0	0	0	-99.6	138.888116	217.8	138.888116
0	2000	0	-99.429921	138.743702	217.974531	139.061344
0	4000	0	-99.321701	138.659102	218.086831	139.172254
0	6000	0	-99.283105	138.641142	218.129099	139.213888
0	8000	0	-99.316923	138.691443	218.098375	139.183632
0	10000	0	-99.420706	138.806179	217.996804	139.083375
0	12000	0	-99.587012	138.976515	217.831433	138.919392
0	14000	0	-99.804115	139.189609	217.613605	138.701953
0	16000	0	-100.057069	139.429999	217.357998	138.444696
0	18000	0	-100.328973	139.681097	217.081468	138.163784
0	20000	0	-100.602271	139.926575	216.801792	137.876891
0	22000	0	-100.859958	140.151483	216.536464	137.602089
0	24000	0	-101.086594	140.343028	216.301616	137.35669
0	26000	0	-101.269091	140.491032	216.111139	137.156144
0	28000	0	-101.397253	140.588125	215.976019	137.01305
0	30000	0	-101.464114	140.629772	215.903879	136.936369
0	32000	0	-101.466126	140.614208	215.898715	136.930872
0	34000	0	-101.403216	140.542364	215.960771	136.996859
0	36000	0	-101.278782	140.417817	216.086552	137.130157
0	38000	0	-101.099597	140.246759	216.268949	137.322393
0	40000	0	-100.875636	140.037978	216.497497	137.561513
0	42000	0	-100.619754	139.80275	216.758787	137.832525
0	44000	0	-100.347182	139.554588	217.037068	138.118427
0	46000	0	-100.074793	139.308728	217.315071	138.401266
0	48000	0	-99.820116	139.081313	217.575024	138.66327
0	50000	0	-99.600145	138.888242	217.799851	138.887968

表 3:  $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_3 = 0^\circ$  のときのカム部の動きの計算値テーブル。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  の欄は各モーターに与えたパルス数を表している。50000 パルスがシャフト 1 回転に相当する。

計算による台の傾き	測定による台の傾き
0	0
0.001000748	0.001121884
0.001616693	0.001828255
0.001804423	0.002063712
0.001550615	0.001855956
0.000873285	0.001191136
-0.000179961	0.000124654
-0.001536323	-0.001288089
-0.003104147	-0.002922438
-0.004780287	-0.00468144
-0.006457649	-0.006468144
-0.008032208	-0.008144044
-0.009409102	-0.009626039
-0.010507548	-0.010817175
-0.011264575	-0.01166205
-0.011637604	-0.012105263
-0.011605999	-0.012119114
-0.011171731	-0.011703601
-0.010359228	-0.010900277
-0.009214417	-0.009750693
-0.007803008	-0.008282548
-0.006207808	-0.006634349
-0.004524991	-0.004847645
-0.00285914	-0.003074792
-0.001317106	-0.001412742
-8.63264E-07	0

表 4:  $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_3 = 0^\circ$  のときの台の傾きの計算値テーブル

## 参考文献

- [1] Ryuhei Sugahara et al. *Ground Motion Measurement and Vibration Suppression at KEK*. KEK-PREPRINT-2005-77, Nov 2005. 13pp
- [2] 佐藤政則 加速器制御入門 OHO'04
- [3] Helmut Wiedemann. *Particle Accelerator Physics Basic Principles and Linear Beam Dynamics*. Springer-Verlag
- [4] 山下了 リニアコライダーの物理 OHO'06
- [5] 横谷馨 リニアコライダーの構成 OHO'06
- [6] 古屋貴章 超伝導空洞の基礎 OHO'06
- [7] 佐伯学行 超伝導加速空洞の製作技術と計測技術 OHO'06
- [8] 栗木雅夫 粒子源の設計と現状 OHO'06
- [9] 大西幸喜 加速器の基礎とダンピングリング OHO'06
- [10] 奥木敏行 最終収束系の設計 OHO'06
- [11] Yuichi Morita et al. *Development of a mover having one nanometer precision and 4mm moving range*. IWAA'06
- [12] 熊谷教考 高エネルギー加速器用電磁石 OHO'84
- [13] 株式会社メステック 静電容量型変位計 M-2213 取扱説明書
- [14] K. Saito. *High Gradient SRF cavity and ILC project*
- [15] (株)キーストンインターナショナル(独ピエゾメカニクス社のホームページを和訳したピエゾの仕様書ページ) <http://www.keystone-intl.co.jp/products/piezo/detail/p36.htm>
- [16] PI: Designing with Piezoelectric Actuators. Nanopositioning Tutorial. [http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo\\_tutorial.php](http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo_tutorial.php)
- [17] Piezoelectricity - APC international. Ltd. [http://www.americanpiezo.com/piezo\\_theory/index.html](http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/index.html)

[18] 圧電セラミクス入門 <http://www.nahaoka-ct.ac.jp/ec/mes1/piezo/piezo.htm>

[19] BERNARD JAFFE. *PIEZOELECTRIC CERAMICS*. ACADEMIC PRESS

## 謝辞

本研究の機会を与えて頂き、適切な指導、助言を下された指導教員山下了助教授<sup>A</sup>に心より感謝します。本研究を通して多くの御指導、助言を賜りました菅原龍平教授<sup>B</sup>に心より感謝します。増澤美佳氏<sup>B</sup>には研究のすべての面で厚く御指導頂きました。厚く御礼申し上げます。山岡広氏<sup>B</sup>、東保男氏<sup>B</sup>にはハード面において多くの知識、技術を教えて頂きました。深く感謝します。小田切淳一氏<sup>B</sup>、中村達郎氏<sup>B</sup>にはPLC及びEPICSの操作に関して厚く御指導頂きました。心より感謝します。両氏のご協力無くしてここまで辿り着けなかったでしょう。小田切淳一氏にはEPICSのインストールまでして頂き、感謝の言葉もありません。EPICSのsequencerに関して行き詰っていたところ、荒木栄氏<sup>B</sup>に的確なアドバイスを頂きました。ご協力して頂き、ありがとうございました。高度な製作技術が求められる台座にもかかわらず、製作を快諾して下さった特許機器株式会社に深く感謝します。

所属：

東京大学素粒子物理国際研究センター<sup>A</sup>

高エネルギー加速器研究機構<sup>B</sup>