

サーボ機構の高性能化*

橋田 鉄雄

Development of Advanced Servomechanism*

Tetsuo KITTA

要 約

積層圧電アクチュエータ素子の油圧制御機構への応用に関して研究した。素子の特性値を実測し、制御回路を設計し、試作した変位アクチュエータへの適用実験を行い、基礎的な特性値を得た。

1. 緒 言

大出力の油圧シリンダの精密駆動方法に関して、制御方式・機構および変位測定方法等について検討した。

現在までに、スプール弁の制御機構は各種実用化されているが、弁の小型化および高速化のために、積層圧電アクチュエータ素子（以後圧電素子という）を駆動源とし、直径の異なる2つのベローズを縦列接続して変位拡大機構として用いた微小変位アクチュエータ（以後変位アクチュエータという）を試作した。この変位アクチュエータの出力をスプール弁の軸に連結し、油圧シリンダの精密制御をしようというものである。

本報告では、圧電素子の定数測定方法・駆動方法および静特性、ならびに変位アクチュエータの静特性についてのべる。

2. 圧電素子の定数測定方法

与えられた圧電素子の主な仕様は付録のとおりであるが、最大変位量・静電容量及び内部抵抗を実測した。

2-1 電圧駆動特性

直流可変電圧電源により、電圧上昇時と下降時のヒステリシスを測定した。測定回路を図1に、印加最高電圧150Vで分極した後の変位を図2に示す。この測定は東京精密製三次元測定機MODEL-GJ600A-Rを用いた。

2-2 静電容量測定

*本研究は、昭和61年度中小企業技術指導員養成課程6ヶ月研修における実習として、工業技術院機械技術研究所において実施したものである。

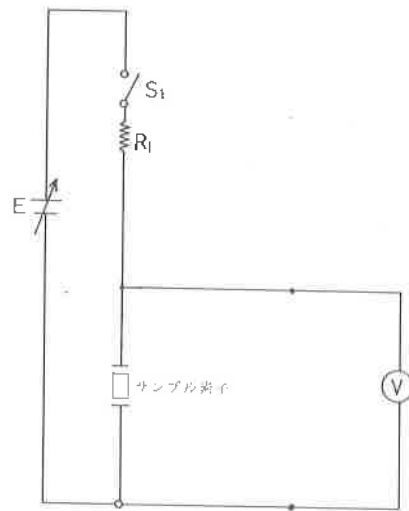


図1 ヒステリシス特性測定回路

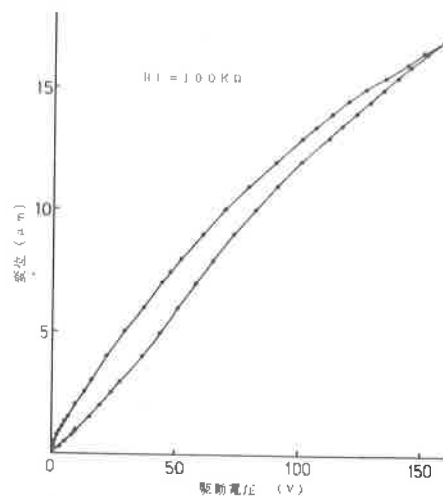


図2 電圧制御特性

圧電素子の等価回路を図3のように、コンデンサ

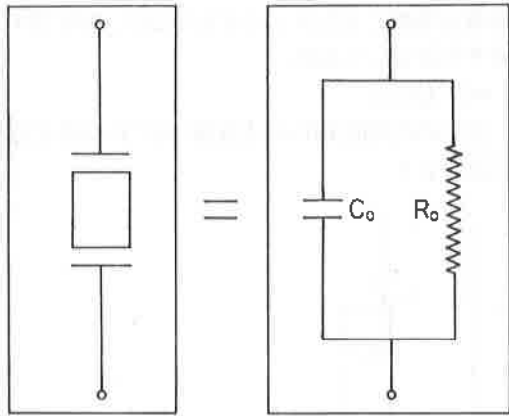


図3 圧電アクチュエータの等価回路

C_0 と抵抗 R_0 の並列回路と考えると（インダクタンス分は無視する）、静電容量を測定した。

(イ) 方法1

抵抗 R_1 を介して、サンプル素子およびコンデンサを直列接続し、直流電圧を印加する。

電流 i は $i = I \exp(-t/RC)$ となりゼロに収束するので充分時間経過後アクチュエータ素子およびコンデンサのそれぞれの端子電圧を測定する。流入電荷 Q は、 $Q = C_0 \times V_0 = C_x \times V_x$ であるので、既知の C_x により C_0 が計算できる。

この方法を図4に、実測結果を図5に示す。

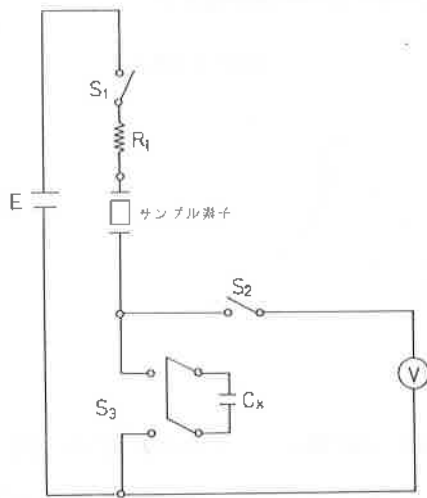


図4 静電容量測定回路 1

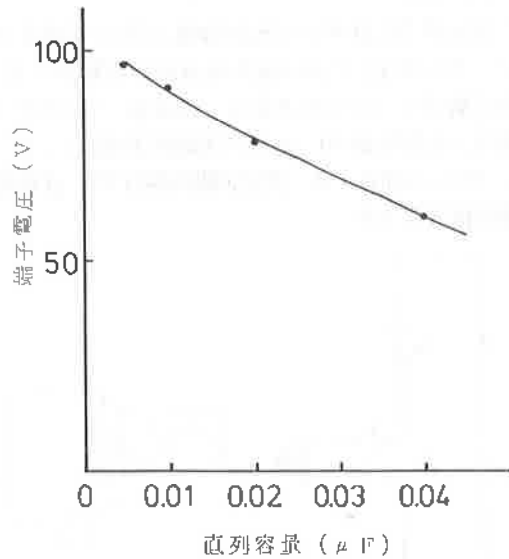


図5 直列コンデンサによる電圧分担

ただし、 $I = E/R$ $R = R_1 + R_0$ サンプル素子、コンデンサ共に、端子を短絡して残存電荷をなくしておく。

(ロ) 方法2

方法1と同様に考えて、圧電素子に充電された電荷 Q が並列に接続されたコンデンサに分配され、端子電圧が V_0 から V_1 に降りし電荷が $Q = Q_1 + Q_2$ に分配されるとすると、 $Q_1 = C_0 \times V_1$ $Q_2 = C_x \times V_1$ であるから $C_0 = V_1 \times C_1 / (V_0 - V_1)$ となる。

図6に測定回路を示す。

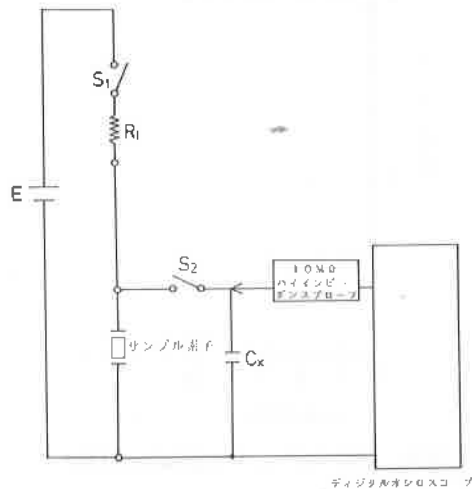


図6 静電容量測定回路 2

(イ) 方法3

圧電素子に直列に電流制限抵抗 R_x を接続しスイッチ S_1 を閉じた後の流入電流波形を観察する。時定数は $C_0 \times R_x$ であるから、電流値 (R_x の端子電圧) が初期値の $1/e$ になる時間を実測して、 $C_0 = t/R_x$ から計算する。測定回路を図7に、計算結果を図8に示す。

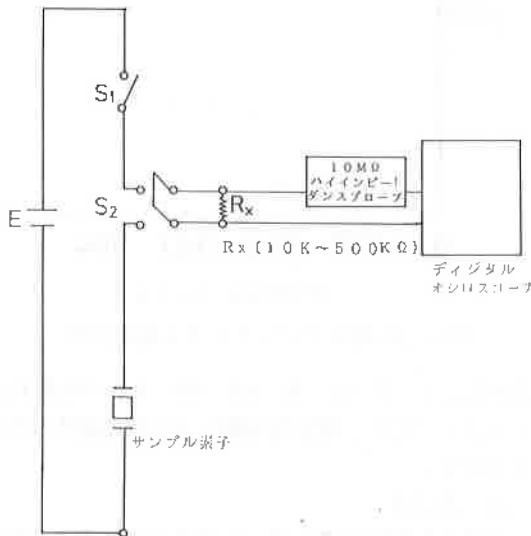


図7 静電容量測定回路 3

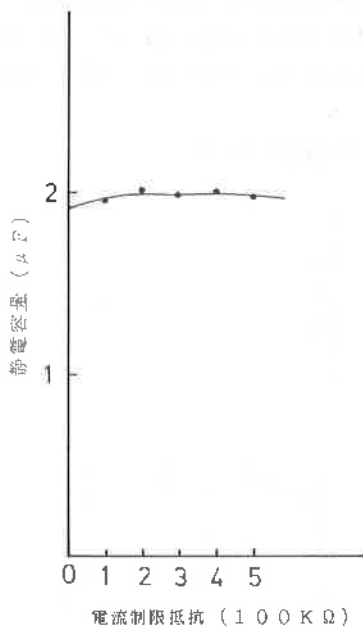


図8 時定数による静電容量計算値

2-3 内部抵抗測定

(イ) 方法1

図7のサンプル素子に並列に放電抵抗をスイッチ S_4 を介して接続し、時定数測定回路とする。静電容量測定方法3と同様であるが、抵抗 R_x の値を大きくしてある。

(ロ) 方法2

図9に直列抵抗 R_x の電圧降下による時定数測定法を示す。

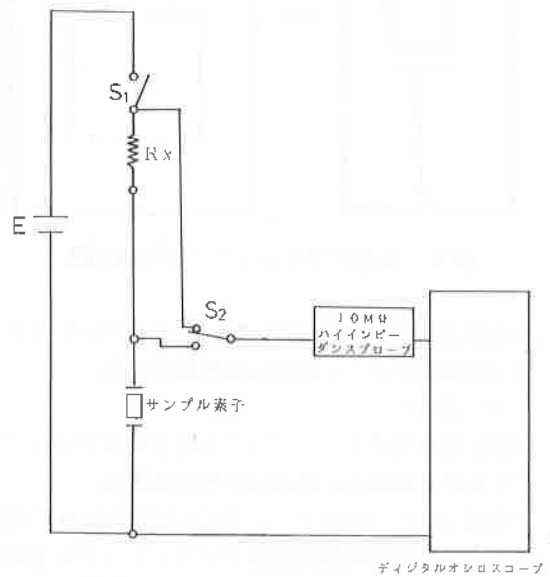


図9 電圧降下による時定数測定回路

スイッチ S_1 を閉じて充分時間経過後、 S_2 を切り替える。

以後の端子電圧は、図10の測定例のように、電源電圧 E から急落下後漸減する。

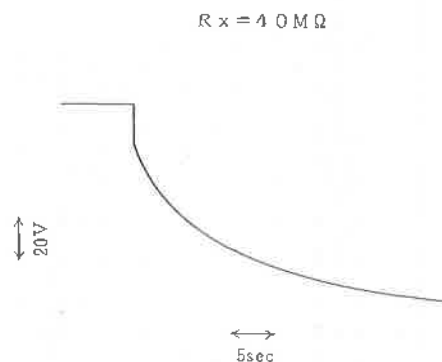


図10 電圧降下法による内部抵抗測定例

急落下した大きさが抵抗 R_x による電圧分担値である。

漸減するのは、サンプル素子に充電された電荷が、測定系のプローブに吸引されて、端子電圧が降下するためである。プローブのインピーダンスは10MΩであるので、測定電圧は $10E / (10 + R_x)$ (V) に収縮する。

図8による静電量値を考慮して、静電容量値 C_0 、 R_0 を計算したものがそれぞれ図11、図12である。

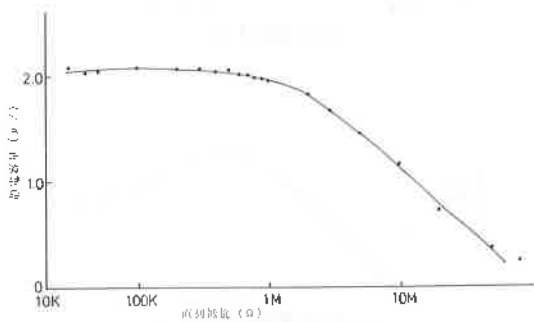


図11 静電容量計算値

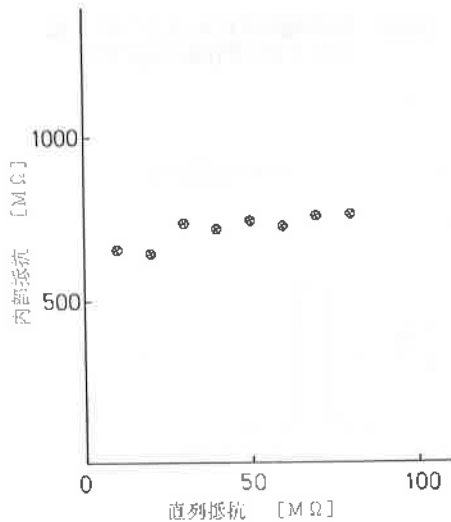


図12 内部抵抗計算値

$C_0 = 2.05 \mu F$ $R_0 = 780 M\Omega$ を得た。

3. 駆動方法および静電特性

3-1 高速応答用回路

図13に示す回路による。

回路の動作

OPアンプの2番ピンに設定電圧を入力するとOP出力がハイになり、Q1・Q2がOFF、Q3がONになる。

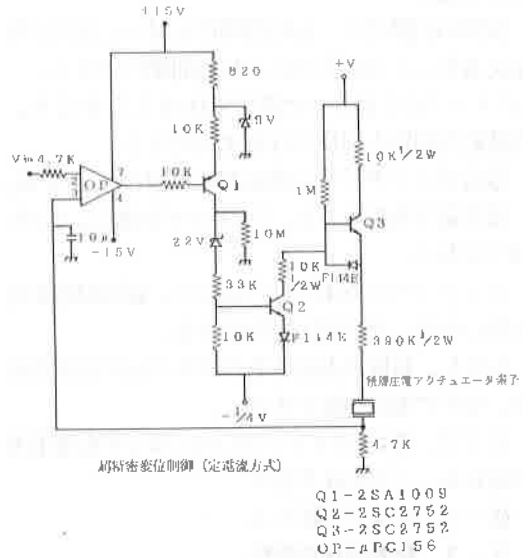


図13 高速変位制御 (定電流方式)

Q3がONになると、圧電素子に電荷が流れ、電荷量に比例した電圧がOPアンプの3番ピンに加わる。電圧が上昇していき、 V_{in} の大きさを越え、OPアンプの出力がローになる。

従って、Q3がOFFになって、圧電素子の電荷は R_d を通して放電される。

設定電圧の高さによって、充電量が決定され、変位の大きさが制御される。

3-2 一定変位用回路

図14に示す回路による。

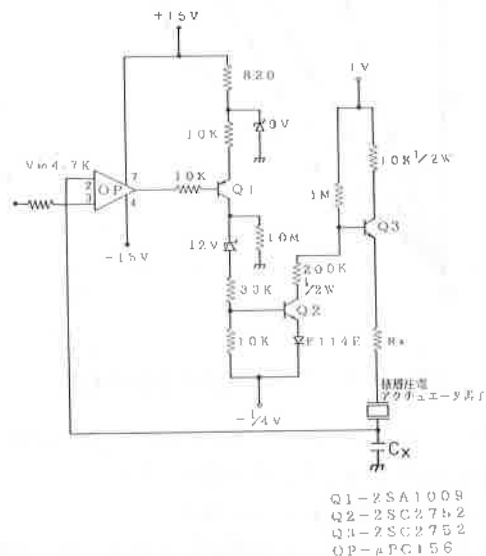


図14 変位維持制御回路

回路の動作

図13の回路では、長時間変位を保つことは困難であるが、この回路では、長時間維持できる。OPアンプの3番ピンに設定電圧を入力すると、高速応答回路と同様にQ3がONになる。

電荷がコンデンサに充電され、電圧が上昇する。設定電圧を越えると、OPアンプが働き、Q3がOFFになる。

コンデンサに充電された電荷は、放電回路を持たないので、その電圧を持続する。

しかし、基板の表面等をわずかに漏れ電流が流れ、やがて電圧が降下する。

そこで、またOPアンプがONになって充電電流が流れる。これを繰り返す。

従って、変位が持続する。

3-3 駆動回路の特性

(イ) コンデンサによる特性

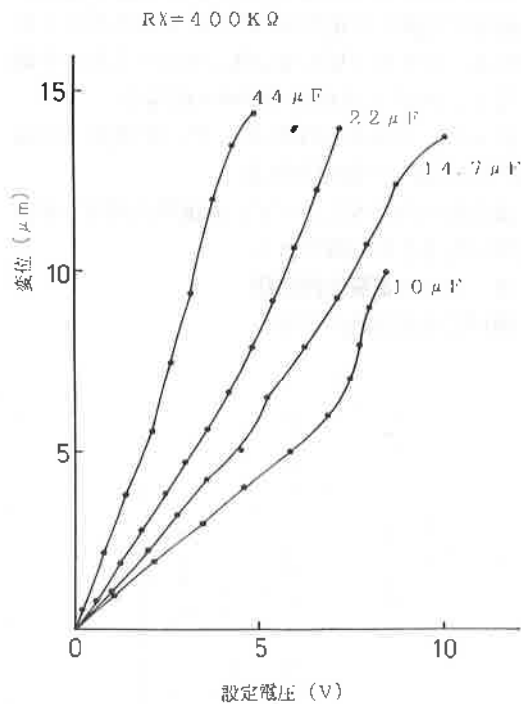


図15 コンデンサによる変位の相違

図15のとおりコンデンサの容量が小さくなるに従って設定電圧を高くしなければならない。

(ロ) 電流制限抵抗による特性

図16、17、18のとおり抵抗値を小さくするにしたがって、立ち上がりスピードは増していく。

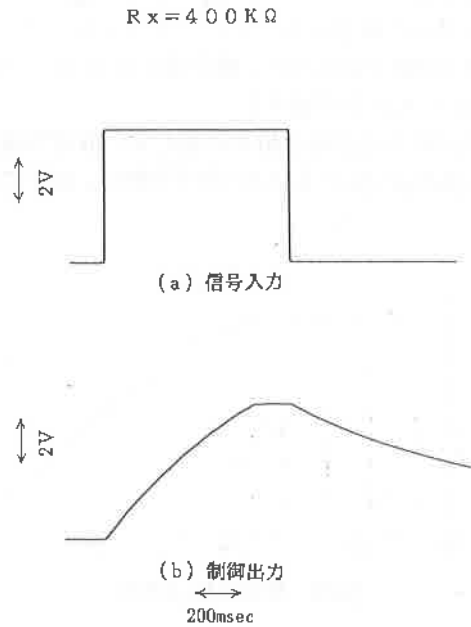


図16 電流制限抵抗の大きさによる立ち上がり時間の測定例 1

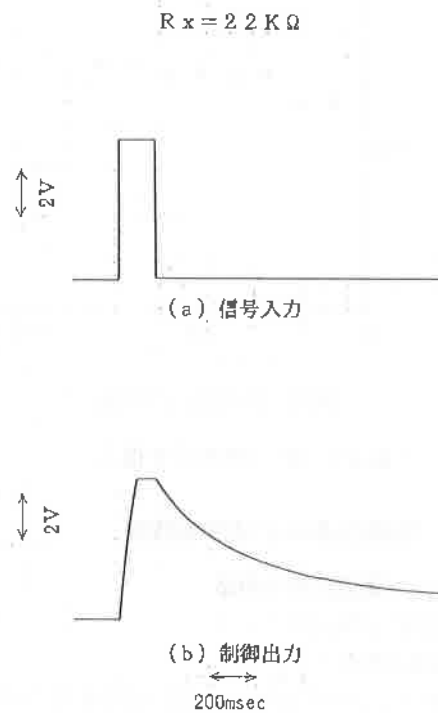


図17 電流制限抵抗の大きさによる立ち上がり時間の測定例 2

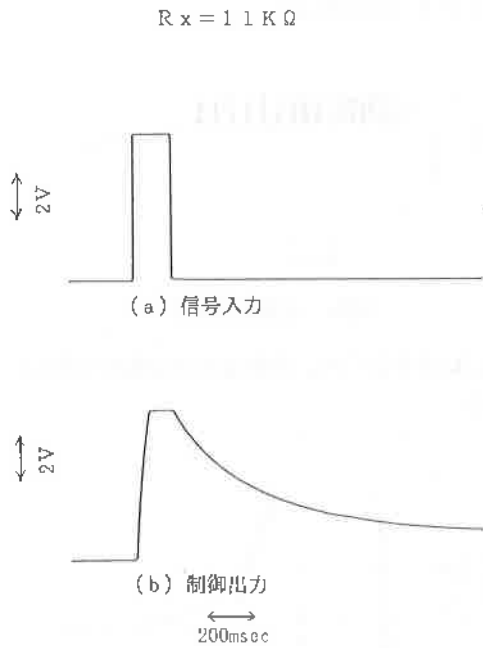


図18 電流制限抵抗の大きさによる立ち上がり時間の測定例3

4. 変位アクチュエータの静特性

高性能変位アクチュエータの構成
図19に変位アクチュエータの構成を示す。

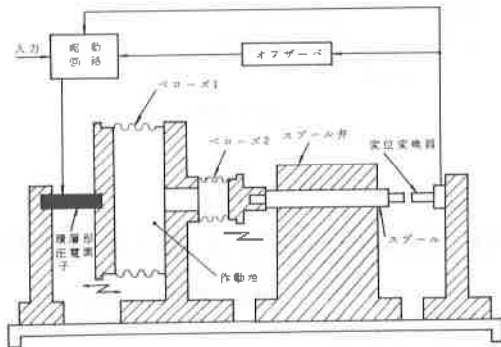


図19 高性能微小変位アクチュエータの構成

4-1 空特性

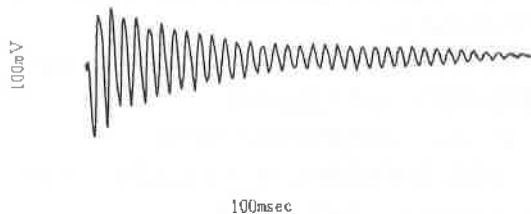


図20 ベローズの出力側インパルス応答

図20に油無しの場合の出力側ベローズのインパルス応答の例を示す。

静止位置により変化した後の振動状態を表している。

4-2 油入りの特性

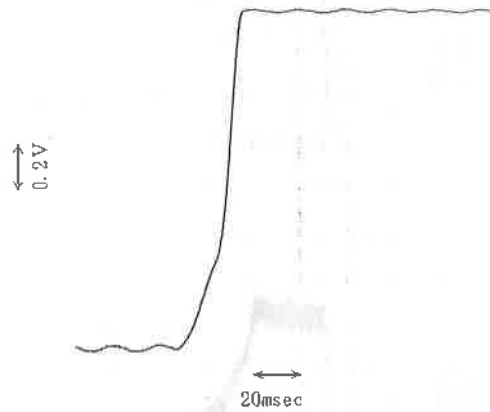


図21 ベローズの入力側インパルス応答

図21に油入りの場合の入力側ベローズのインパルス応答の例を示す。

4-3 実験結果

一定変位を得るための駆動条件

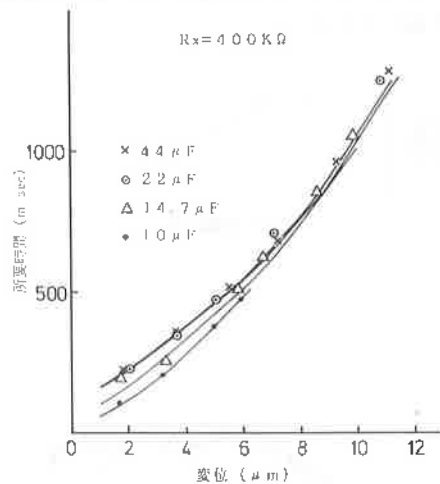


図22 立ち上がり特性

図22に示すように、コンデンサの容量による立ち上がり時間の相違は無視できる。

しかし、容量が小さくなるに従い不安定になる。図15に示すように、22 μ F程度が最適である。

容量が大きいと設定の精度が低下する。

図16、17、18に示すように、合計20K Ω 程度ま

で小さくし、応答速度を早めることが出来た。

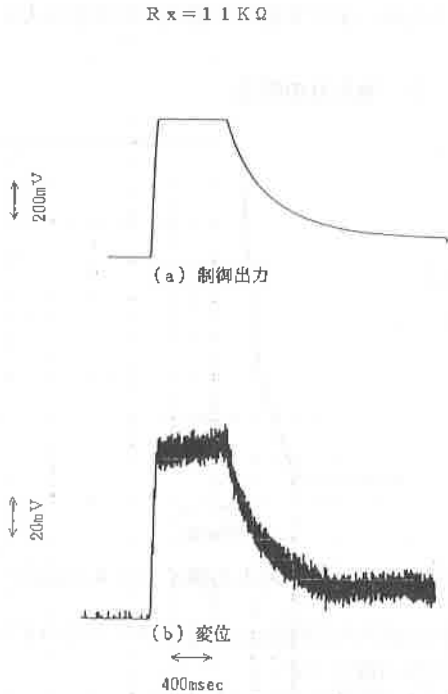


図23 渦電流変位検出器による出力波形

図23に示すように、短時間では、変位は制御電圧に比例している。

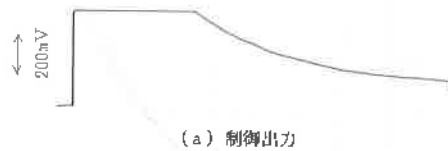


図24 渦電流変位検出器による長時間出力波形

図24に示すように、長時間では、微小振動を含

み、上昇する傾向を示す。

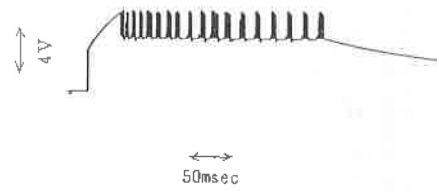


図25 充電電流波形

図25に示すように、充電電流が周期的に流入している。

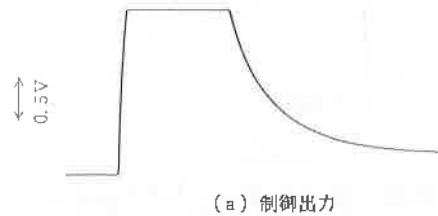


図26 接触式変位検出器による長時間出力波形

図26に示すように、接触式変位計の場合には、応答が乱れている。

5. 考 察

図4の回路による測定結果では、 $0.04\mu F$ と小さな値である。

これは、測定器がテスターであり、メータの応答が遅いためであると思われる。

従って、この結果は採用しがたい。

圧電素子の時定数は、26分となるがもっと永いようであるが、測定していない。

図11では、 $1M\Omega$ 以上で急降下している。

これは測定系の入力インピーダンスが10MΩと高いが、内部抵抗R₀がさらに2桁近く高いために測定端子を接続することが短絡効果となるためである。

図13に示す回路では、Q3がOFFした後の放電時にコンデンサが逆極性になり種類によっては、破壊される場合がある。また、放電抵抗がないと、静電容量の逆比に案分された電圧がOPアンプにかかるので電圧によっては、破壊される。

コンデンサの種類による特性を考慮することが大切であると思われる。

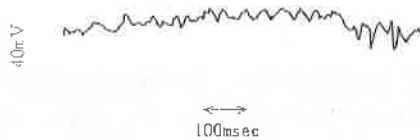


図27 電圧検出端子短絡の場合の渦電流出力波形

図27に示すように、積分回路をショートした場合には、上昇傾向はなくなる。

これは、図25に示す充電電流がないために圧電素子が純静的に変位を保っているためであると思われる。これに対して、図24のように、上昇傾向を示すのは、トリガー型の充電電流によって交番的に駆動され、内部摩擦による発熱、更に、熱膨張ではないかと思われる。

この現象については、綿密な検討が必要である。

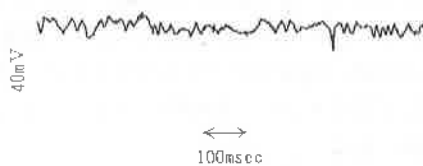


図28 無駆動時の渦電流出力波形

図28に示すように、駆動電圧を印加しない場合も微小振動を感じているので定盤を含む支持系の除振が重要であると思われる。

変位アクチュエータの特性について、は約15倍程度の変位拡大を認めているが、設計通りではな

い。

これは、ベローズのいわゆるジャバラの部分に空気が残存しており、圧縮力を吸収してしまうためと思われる。今回の実験では空気を完全に抜き取ることが出来なかったと思われるので、所期の結果が得られなかった。

循環式等で完全に空気抜きをしさらに予圧をかけて封入すれば良い結果が得られると思われる。

参考文献

- 1) 長森・木地：アナログ計算機入門，(株)オーム社（1966）
- 2) 池辺・中田：電わい素子を用いたサーボ弁の研究，精機学会雑誌（1971）
- 3) 池辺・中田：電わい素子を用いたサーボ弁，油圧と空気圧 Appli（1972）
- 4) 中田：パルス幅変調器の非線形除去効果と周波数特性，計測自動制御学会（1974）
- 5) 岡村：OPアンプ回路の設計，(株)CQ出版社（1972）
- 6) 伊藤・木村・細江：線形制御系の設計理論，(財)計測自動制御学会（1978）
- 7) 中田・池辺：スプール弁の非定常軸力の研究—非定常軸力の測定，油圧と空気圧 Jan（1980）
- 8) 内野：圧電アクチュエータ開発・応用の要点，(株)日本工業技術センター（1984）

付録 積層圧電アクチュエータ素子の主な仕様。

特性項目	
素子形状（縦×横×高さ）	5×5×18mm
最高駆動電圧	150V
最大変位量	16.5±2.0μm
最大発生応力	85kg
自己共振周波数	100KHz
耐電圧	300V
電気絶縁抵抗	100MΩ以上
静電容量お詫び許容量差	1.6±20% μF
誘電損失	0.035以下tan δ
引張強度	10.0kg以上
圧縮強度	750kg以上
使用温度範囲	25～+85℃