
超磁歪素子を用いた高速流体増幅アクチュエータの
基礎研究と燃料噴射弁への応用

(課題番号 07455111)

平成7・8年度科学研究費補助金 [基盤研究(B)(2)]

研究成果報告書

平成9年3月

横浜国立大学附属図書館



10304022

研究代表者 田中裕久 (横浜国立大学大学院工学研究科 教授)

研究分担者 佐藤恭一 (横浜国立大学工学部 講師)

はしがき

磁歪とは、磁性体が磁化により歪みを生じ、寸法が変化する現象である。Ni、Coは磁歪を示す代表的な物質であり、一般的に 40×10^{-6} 程度の歪みを生じるが、寸法変化としては微小である。1970年代後半、米国海軍研究所 Dr.Clark らにより開発された Terfenol-D ($Tb_{0.23} \sim 0.3 Dy_{0.7 \sim 0.73} Fe_{1.9 \sim 2}$) や、国産の TbDy (Fe)₂ 合金は、これまでの磁歪材料に比べて極めて大きな最大 2000×10^{-6} という歪率を示す超磁歪材料であり、また、磁界の変化に応じて高応答、高剛性で伸縮する特性を有することから、高速アクチュエータの駆動手段の一つとして注目されている。一方、流体制御用機器（例えば航空用サーボバルブや精密成形機などの制御）のメカトロニクス化には 100N 程度の力で数 mm の直線運動を 1ms 以内で作動するアクチュエータが必要である。近年、超磁歪素子は、変位 0.01mm~0.1 程度の可動範囲の直動アクチュエータに応用されつつあるが、0.1mm 以上の可動領域では長さ 100mm 以上の超磁歪素子が必要となり、コンパクト性を損なうため、小形直動アクチュエータとして実用化された例は見受けられない。本研究は、超磁歪素子とパスカルの原理に基づく流体式変位増幅機構の組み合わせにより、超磁歪素子単体ではカバーできない 0.1mm~1mm 程度の可動領域を有する高速直動アクチュエータ開発に関する基礎研究を行うものであり、さらに、環境問題において、ディーゼルエンジンの燃焼改善手段として効果の高い、高圧 (160MPa) 対応の燃料噴射弁への適用についても言及する。

研究組織

研究代表者	田中裕久	(横浜国立大学大学院工学研究科 教授)
研究分担者	佐藤恭一	(横浜国立大学工学部 講師)

研究経費

平成7年度	3,300 千円
平成8年度	900 千円
計	4,200 千円

研究発表

1. 学会誌等

- (1) Fluid Power Control by Electro-hydraulic Proportional Seat Valves, The 3rd JHPS International Symposium on Fluid Power Yokohama'96, pp.313-318,1996.
- (2) FEM Analysis and Measurement on the Eddy-current in Magnetic Circuit of PWM On/Off- and Proportional-solenoid-valves, The 3rd JHPS International Symposium on Fluid Power Yokohama'96, pp.385-390,1996.
- (3) Electro-hydraulic switching valve controlled by a giant-magnetostrictive actuator with stroke-amplifier, FLUCOME'97 Fifth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Sept. 1-4, 1997 Hayama, Japan (発表予定).

2. 口頭発表

- (1) 超磁歪素子を用いた PWM 高速電磁弁の開発, 平成5年秋季油空圧講演会論文集, pp.33-36.(1993)

目次

第1章 緒言	
研究の動機と経緯	1
第2章 記号	3
第3章 超磁歪材料の特性	
3-1 磁歪曲線	5
3-2 磁歪に関する諸効果とアクチュエータへの応用	7
第4章 超磁歪アクチュエータと変位増幅機構の開発	
4-1 供試超磁歪素子の諸元	9
4-2 ピストン式流体増幅機構を用いた超磁歪アクチュエータ	12
4-3 ベローズ式流体増幅機構を用いた超磁歪アクチュエータ	17
第5章 ピストン式超磁歪アクチュエータの特性評価	
5-1 磁場（電流）-変位特性の静特性の測定	25
5-1-1 測定装置	25
5-1-2 測定方法	25
5-1-3 測定結果	25
5-1-4 考察	25
5-2 磁場（電流）-出力特性の静特性の測定	28
5-2-1 測定装置	28
5-2-2 測定方法	28
5-2-3 測定結果	28
5-2-4 考察	33
5-3 磁場（電流）-変位特性の動特性の測定	34
5-3-1 測定装置	34
5-3-2 測定方法	34
5-3-3 測定結果	38
5-3-4 考察	59
第6章 ベローズ式超磁歪アクチュエータの特性評価	
6-1 磁場（電流）-変位特性の静特性の測定	61
6-1-1 測定装置	61
6-1-2 測定方法	61
6-1-3 測定結果	61
6-1-4 考察	61

6-2	磁場（電流）－出力特性の静特性の測定	64
6-2-1	測定装置	64
6-2-2	測定方法	64
6-2-3	測定結果	65
6-2-4	考察	72
6-3	磁場（電流）－変位特性の動特性の測定	72
6-3-1	測定装置	72
6-3-2	測定方法	73
6-3-3	測定結果	73
6-3-4	考察	85
第7章 超磁歪素子を用いた高速オンオフ弁の開発と特性試験		
7-1	超磁歪高速電磁弁の開発の背景	87
7-2	超磁歪高速電磁弁の構造	87
7-3	FEM 非定常磁場解析による最適励磁法の検討	92
7-4	超磁歪高速電磁弁による高速流体パルス制御	94
第8章 超磁歪アクチュエータを用いた燃料噴射装置の構想と基本設計		
8-1	高速高圧燃料噴射による排気ガス性状の向上	97
8-2	パイロット制御式燃料噴射弁の構造	97
8-3	燃料噴射弁の諸元とシミュレーションによる動特性評価	101
8-4	ボンドグラフを用いた燃料噴射弁の動特性シミュレーション	102
第9章 結言		
		107
謝辞		
		108
参考文献		
		109

第1章 緒言

1-1 研究の動機と経緯

流体制御用機器（例えば航空用サーボバルブや精密成形機などの制御）のメカトロニクス化には、100N程度で数mmの直線運動を1ms以内で作動するアクチュエータが必要である。これまで、申請者らは、通常の直動ソレノイド形電磁アクチュエータについて、渦電流の生じにくい電磁ステンレス鋼の採用やソレノイド励磁方法の詳細な検討により、高速にオンオフする電磁弁（弁変位:0.3mm、力:70N、切換時間:0.8ms以内）を開発実用化してきた。しかし、通常の電磁アクチュエータでは、その高速化は機械的作動遅れや磁気飽和現象など要因によりこの程度が限界であり、より高速な駆動手段として、共振周波数の高い固体アクチュエータの開発が必要と考えている。

固体アクチュエータによる機械的エネルギーへの変換には、熱を利用した形状記憶合金、電界による圧電効果、電歪効果、磁界による磁歪効果などが挙げられる。強磁性体を磁化した際に、歪みを生じ、その寸法が変化する磁歪現象は、18世紀中頃に Joule によって発見されて以来多くの研究がなされているが、対象となった Ni、Co、Fe などの磁歪率は 40×10^{-6} 程度と小さいものであったため、その多くはアクチュエータへの応用研究ではなく、磁性体の物性に関連した研究であった。しかし、1980年代に入ると、米国海軍研究所 Dr. Clark らによる 2000×10^{-6} の歪みを生じる超磁歪素子 $Tb_{0.23 \sim 0.3} Dy_{0.77 \sim 0.8} Fe_{1.93 \sim 2.0}$ の開発（1974）と、商品名 Terfenol-D としての市販化が起点となり、磁歪材料のアクチュエータへの適用が注目され始めた。また、国内でも $TbDy(Fe)_2$ 合金からなる、磁歪率は Terfenol-D にやや比べ若干小さいが加工性の良い素子が開発されている。現在、超磁歪素子アクチュエータの開発は、ソナー関連の高周波発信子、数マイクロオーダーの微小位置決め機構、超小型バルブ・ポンプなどを対象に活発に行われているが、超磁歪素子単体での 0.1mm 以上の直動範囲を持つリニアアクチュエータへの実用例は見受けられない。これは、仮に磁歪率 1000×10^{-6} で 0.1mm の寸法変化を得るためには、長さ 100mm の超磁歪ロッドを必要とし、コンパクト性を損なうためである。超磁歪直動アクチュエータを 0.1mm 以上の範囲に適用するためには、変位増幅機構が必要であり、超磁歪素子の磁気歪み特性等の電磁気学的評価、変位増幅機構の増幅効率、周波数特性等の機械工学的評価を両面からの工学的アプローチをアクチュエータ設計に取り入れる必要がある。

一般に、圧電素子、超磁歪素子等の微小変位を増幅する方法としては、機械リンク機構（てこ）が利用されている。しかしながら、必ずしもコンパクトに機構を構成できない、弾性変形により所要の変位に増幅できない、支点における繰り返し疲労等の問題があり、十分な性能を発揮できていない。そこで、本研究では超磁歪素子を高速電磁アクチュエータとして活用できるようにするため、変位拡大機構にパスカルの原理を用いて増幅する方法を提案し、適用目標として、ディーゼルエンジンの燃焼改善に効果が高い、高圧対応の燃料噴射弁の弁リフト量制御に適用する課題を取り上げることとした。

本研究では、

(1) 2種類の流体式変位増幅機構を製作し、この変位増幅特性、剛性、超磁歪素子との適合性、取り扱いの簡便性などを評価した。流体式増幅機構の一つは、大ピストンの微小直動運動をシリンダ内に封入した流体を介して、小ピストンに伝達する方式であり、封入流体の圧力調整により超磁歪素子に加えるプレストレスを容易に設定できる、機構の剛性が高いなどの特徴を持つが、ピストンしゅう動部からの流体のリークが無視できず、しゅう動部のシールと流体の補給方法が重要である。もう一つは、大小のピストンを有効断面積の異なる大小の金属ベローズに置き換えたものである。ゼロリークで取り扱いが簡単であり、機構を簡素化できるが、外力に対しては、変位増幅に寄与しないベローズ軸方向以外の体積変化を生じるため、剛性が低いという問題点がある。また、両者の機構について、封入する流体中の気泡除去が重要であることもわかった。この2種類の機構の特性試験の結果、超磁歪アクチュエータ用の変位増幅機構には、剛性が高く、流体制御弁用途に利用する場合は流体の補給も得やすいなどの特徴を持つ、ピストン式が適していると判断した。

(2) 次にピストン式流体増幅機構を搭載した超磁歪アクチュエータを設計製作するとともに、ソレノイドの励磁電圧波形にはFEMを用いた非定常磁場解析を適用して最適化をはかった。超磁歪素子には、直径10mm×長さ78mmの超磁歪素子丸棒と、これと同サイズで、さらに大きな歪み率を得る目的で1.5mm厚にスライスしたSm-Co系永久磁石5枚と素子を交互に挟んだ磁気バイアス型の2種類を製作し、磁歪特性の比較を行った。特性試験の結果、後者の磁気バイアス型は、超磁歪素子単位長さ当たりの磁歪は前者の素子に比べて10%大きい。寸法変化に寄与しない永久磁石を含む分、全長の寸法変化としては、両者はほぼ同じであることがわかった。

(3) そこで、生産性、コストの観点から前者の超磁歪素子を選定し、この超磁歪アクチュエータとシート径6mm×ストローク0.25mmのポペット弁を結合した高速電磁弁を製作して、そのパルス流体制御特性を調査した。この種の弁は電磁氣的、機械的作動遅れのために、通常50~100Hz程度の搬送波周波数によるPWM流体制御が行われるが、今回、ソレノイド励磁方法の最適化と超磁歪アクチュエータによる高速な弁体の駆動により、搬送波周波数300HzにおけるPWM流体制御に成功した。

第2章 記号

第3章～第6章で用いる記号

A : コイル内断面積

A_{PL} : 大ピストン断面積 ($=225 \pi \text{ mm}^2$)

A_{PS} : 小ピストン断面積 ($=9 \pi \text{ mm}^2$)

A_{BL} : 大ベローズ有効面積 ($=7.68\text{cm}^2$)

A_{BS} : 小ベローズ有効面積 ($=0.316\text{cm}^2$)

B : 磁束密度

b : 粘性抵抗係数

F : アクチュエータ推力

F_m : 起磁力

f_f : 小ピストン摩擦力

G : 変位増幅率

H : 磁界の強さ

I : 電流

K_S : 小ベローズばね定数 ($=2.3\text{N/mm}$)

k : 小ピストン押さえばねのばね定数 ($=5.9\text{N/mm}$ 、初期圧縮荷重 : f_0)

L : 超磁歪材料の長さ

l : コイル長さ

M : 内部流体質量

m_{PS} : 小ピストン質量

m_{BS} : 小ベローズ質量

N : コイルの巻き数

p_0 : シリンダ内圧力

R : リラクタンス

x : 大ピストン、大ベローズ変位

y : 小ピストン変位、小ベローズ変位

y_0 : 小ベローズ自然長に対する初期変位

β_e : 体積弾性係数

ϕ : 磁束

μ : 透磁率

第7章で用いる記号

A : 開口面積

B : 磁束密度

C_d : 流量係数

f : 周波数

p_L : 負荷圧力 (*は無次元圧力を示す)

p_S : 供給圧力

Q_S : 最大制御流量

Q_L : 負荷流量 (*は無次元圧力を示す)

t_p : PWM パルス ON 時間

t_s : PWM 搬送波周期

τ : 変調率 ($\tau = t_p/t_s$)

第 8 章で用いる記号

A_c : 主弁受圧面積 (P_c 側)

A_d : 噴射孔面積

A_p : パイロット弁開口面積

A_r : 主弁受圧面積 (P_d 側)

A_u : 主弁受圧面積 (P_u 側)

A_s : 主弁受圧面積 (P_s 側)

b : 弁体しゅう動部の粘性抵抗係数

C_d : 流量係数

D_c : ニードルのコントロール室側直径

D_d : サック直径

D_s : ニードルの供給圧受圧側直径

k_f : 定常流体力による等価ばね定数

m : 弁体質量

P_c : コントロール室圧力

P_d : 噴射圧力

P_s : 供給圧力

P_u : 上流絞りー主弁シート間圧力

Q_c : フィードバックスロット通過流量

Q_d : 噴射流量

Q_p : パイロット弁制御流量

Q_r : 主弁流量

V_c : コントロール室容積

V_d : サック容積

W_c : フィードバックスロット幅

W_m : 弁座の周長

x : 主弁リフト

x_l : フィードバックスロット幅のアンダーラップ長さ

ρ : 作動流体 (軽油) の密度

第3章 超磁歪材料の特性

3-1 磁歪曲線

表3-1に超磁歪材料 (Terfenol-D) の諸特性を圧電材料 (PZT) 及びNiと比較したものを示す⁽¹⁾。市販されている Terfenol-D のロッドの最大寸法 (ロッド径、長さ) は、市販の PZT の5~10倍の長さに当たる。また、PZT の出力は35MPa程度といわれているのに対し、Terfenol-D の出力は700MPa に及ぶことから、Terfenol-D はPZT に比べて大変位、大出力であるといえる⁽²⁾。

表 3-1 超磁歪材料と他材料の特性の比較

特 性	Tb _{0.27} Dy _{0.73} Fe ₂	PZT	Ni
機械的			
密度 kg/m ³	9.25×10 ³	7.7×10 ³	8.97×10 ³
弾性率 N/m ²	2.5~3.5×10 ¹⁰	7.3×10 ¹⁰	32×10 ¹⁰
引張応力 MPa	28	7.6×10 ¹⁰	30×10 ¹⁰
圧縮応力 MPa	700		
熱 的			
熱膨張率 °C	12×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶	13.3×10 ⁻⁶
電氣的			
電気抵抗 μΩ cm	60		700
磁氣的			
磁 化 T	1.0		0.485
キュリー温度 °C	387	300	354
磁 歪			
磁 歪 ppm	1500~2500	670~950	-40
エネルギー密度 J/m ³	14000~25000	1300	
磁気機械的			
結合係数	0.7~0.75	0.65	0.3
音 速 m/s	1720		4900

また、Terfenol-D（正磁歪材料のみ）は温度や予圧縮応力によって磁歪特性がかなり変化する。図3-4は、 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$ のロッドに13.3MPaの予圧縮応力を与え温度を変化させたときの磁歪曲線の変化を示し、図3-5は、温度を一定（20°C）に保って予圧縮応力を変化させたときの磁歪曲線の変化を示す。図3-4、図3-5から、 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$ のTerfenol-Dの場合は、温度0~20°C程度で予圧縮応力7.6MPa付近で使用するのが最も効果的であることがわかる⁽³⁾⁽⁴⁾。

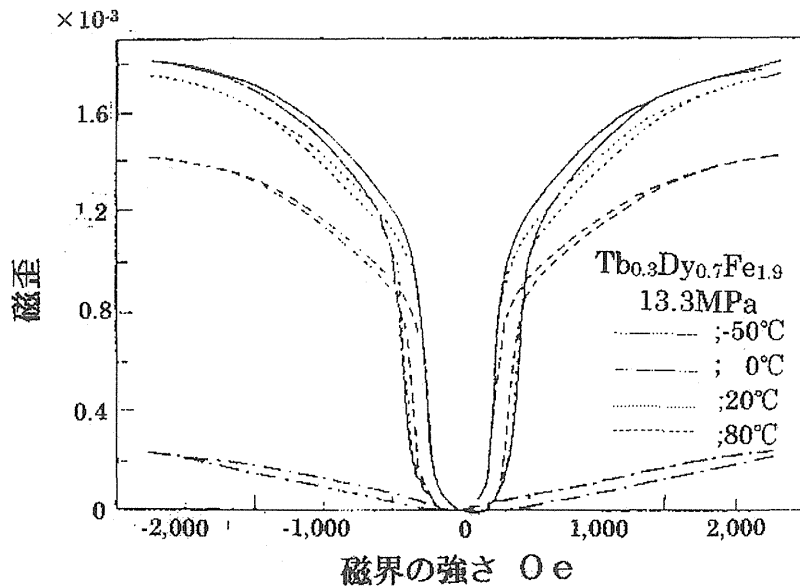


図3-4 13.3MPaにおけるTerfenol-Dの磁歪曲線

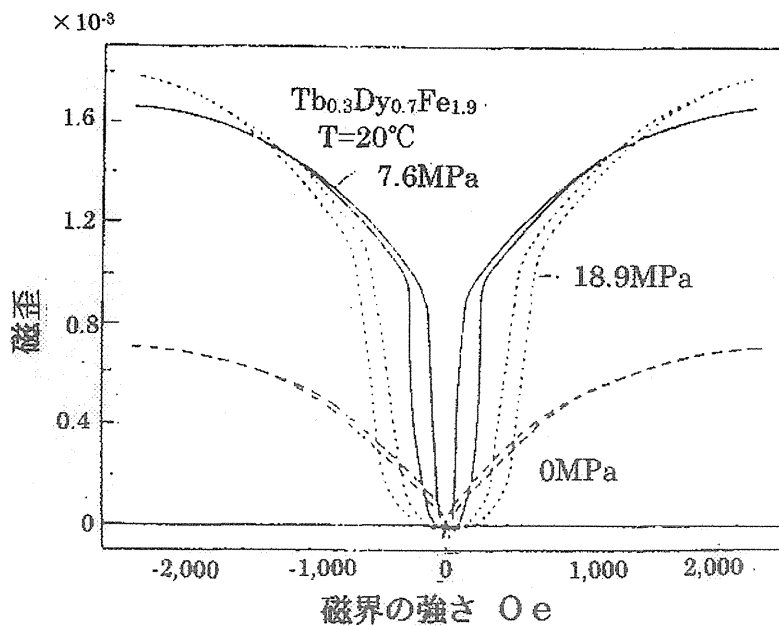


図3-5 0MPa、7.6MPa、18.9MPaにおけるTerfenol-Dの磁歪曲線

3-2 磁歪に関する諸効果とアクチュエータへの応用

一般によく知られている超磁歪材料の特長及び性質として以下のような効果や現象が認められ、デバイスなどへの適用に注目されている。

特長

- (1) 変位量が大きい
- (2) 磁界方向にのびる材料（正磁歪）、逆に縮む材料（負磁歪）がある
- (3) キュリー温度が高い（高温での使用が可能）
- (4) 低電圧駆動が可能である
- (5) 電極がなく、非接触駆動ができる
- (6) 発生応力が大きい
- (7) ヒステリシス特性が小さく、その調整が可能である
- (8) 等方的な駆動ができ、それ故に任意な形状で設計できる
- (9) 構造的にシンプルかつ安定である
- (10) 応答速度が速い
- (11) 薄膜化による上記特長の適用

性質

- Joule 効果
磁界 H に応じて材料の寸法が変化する
- Villari 効果
バイアス磁界下で材料の付加圧に比例して磁化量が変わる
- ΔE 効果
磁界強さに応じて弾性率が変わる
- Viedemann 効果
材料に適切な磁気回路を構成し、電流を流すと材料が捻れ変形する
- 逆 Viedemann 効果
逆に材料に捻れ変形を与えると 2 次コイルに電流が生じる
- Jump 効果
Tb 系超磁歪材料にプレストレスを付加すると磁化量が磁界 H に対して爆発的（Burst 効果とも呼ぶ）に変わり、透磁率も変わる

第4章 超磁歪アクチュエータと 変位増幅機構の開発

4-1 供試超磁歪素子の諸元

本研究で使用した超磁歪材料は3種である。

- (1) 標準形超磁歪素子 ($\phi 10\text{mm} \times L78\text{mm}$ 丸棒) (図4-1, 写真 図4-5)

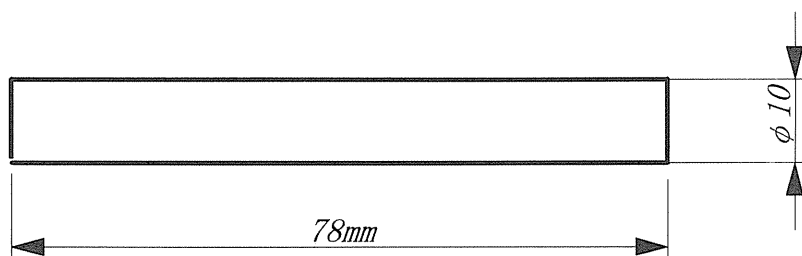


図4-1 標準形超磁歪素子

- (2) 自己バイアス型超磁歪素子 (図4-2, 写真 図4-6)

超磁歪材料に永久磁石をスライスしたものを接着させ、超磁歪材料に磁気的なバイアスを与えて磁歪現象の向上を図った積層型超磁歪素子である。図3-5の磁歪曲線において、作動原点をバイアス磁界によりオフセットさせ、 $d\lambda/dH$ の大きい領域を使うことにより、大きい磁歪を得るものである。

- ・超磁歪材料
 - ①、⑥ $\phi 10 \times 9.25\text{mm}$
 - ②～⑤ $\phi 10 \times 13\text{mm}$
- ・永久磁石 (Sm-Co)
 - $\phi 10 \times 1.5\text{mm}$

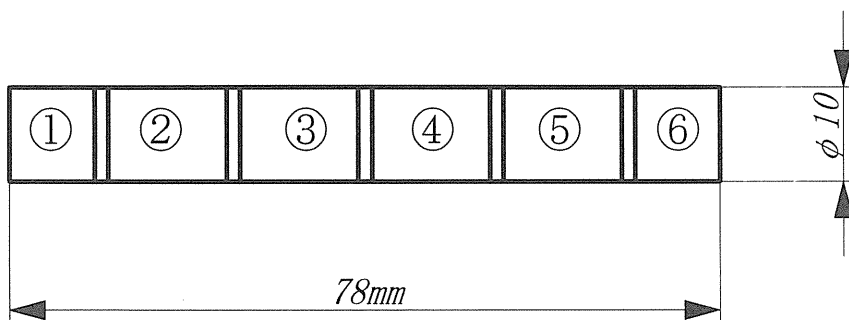


図4-2 自己バイアス型超磁歪素子

(3) ばね予圧式超磁歪素子 (写真 図 4-7)

磁歪合金 ETREMA TERFENOL-D の磁歪現象を利用し、あらかじめ皿ばねによりプレストレスを与えた市販の超磁歪アクチュエータである。その形状については図 4-3、表 4-1 に、磁歪曲線を図 4-4 に示す。

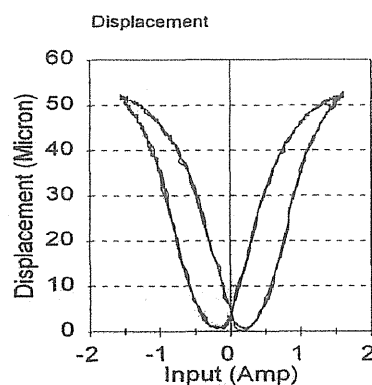
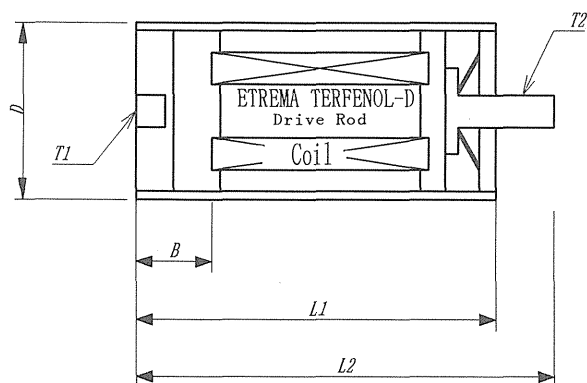


図 4-3 ばね予圧式超磁歪素子 (市販品)

図 4-4 電流-変位特性

表 4-1 ばね予圧式超磁歪素子 (市販品) の諸元

Actuator	
Displacement:	0~50 μ m (0.002")
Force	220N (50lbs)
Frequency Range	DC - 5kHz
Temperature Range	-20 to 75°C (-4 to 167° F)
Diameter, D:	33mm (1.31")
Length, L ₁ :	86mm (3.38")
Length, L ₂ :	100mm (3.9")
Wire Centerline, B	14.7mm (0.58")
Weight:	0.32kg (0.71lbs)
Metric Thread, T ₁ :	M6 × 7mm Depth
Metric Thread, T ₂ :	M6 × 11.4mm Length
English Thread, T ₁ :	1/4 × 28 × 0.28" Depth
English Thread, T ₂ :	1/4 × 28 × 0.45" Length
Peak Input:	± 1.5Amps
DC Resistance	7.0 Ω

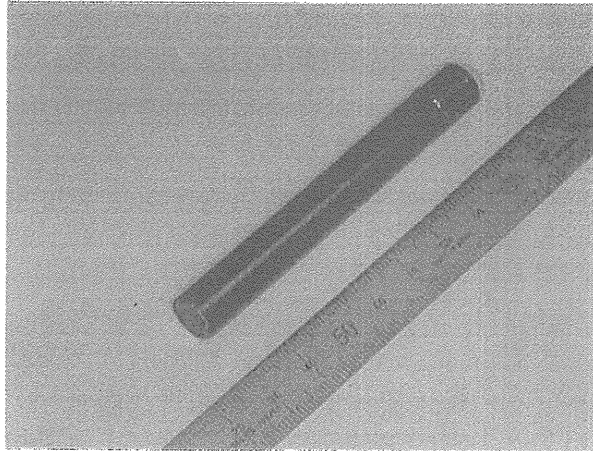


図 4 - 5 標準形超磁歪素子

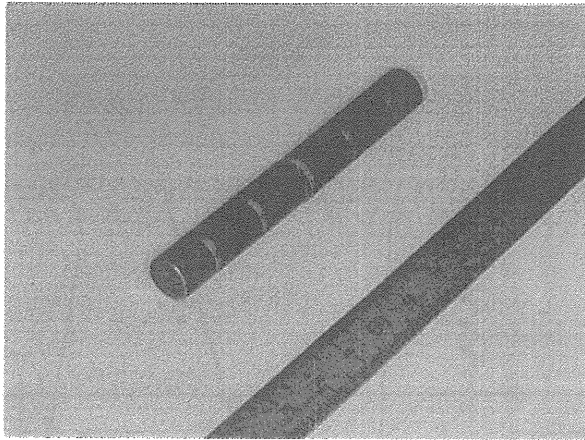


図 4 - 6 自己バイアス型超磁歪素子

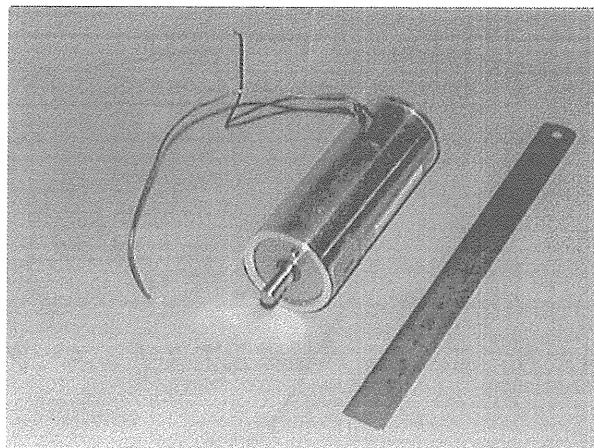


図 4 - 7 ばね予圧式超磁歪素子

4-2 ピストン式流体増幅機構を用いた超磁歪アクチュエータ

図4-8、図4-10に本研究で用いるピストン式流体増幅機構を用いたアクチュエータの構造を示す。また、増幅機構の仕組みを図4-12に示す。アクチュエータ部は、①超磁歪素子（標準形超磁歪素子：図4-1参照、ばね予圧型超磁歪素子：図4-3参照）、②コイル（1360TURN：7.3Ω、767TURN：2Ω）、③ヨーク（SUM22）およびパスカルの原理を応用したピストン式流体増幅機構からなる。④大ピストン（φ30mm）、⑤小ピストン（φ6mm）により理論増幅率は $G=25$ となる。封入流体はVG32相当作動油で、この封入圧力： p_0 と小ピストン押さえばねの初期圧縮荷重： f_0 の設定により、超磁歪素子に適当な予圧縮応力 σ_0 を作用させる。また、漏れによる封入流体の流出に対しては、外部よりチェック弁を介して補給する。

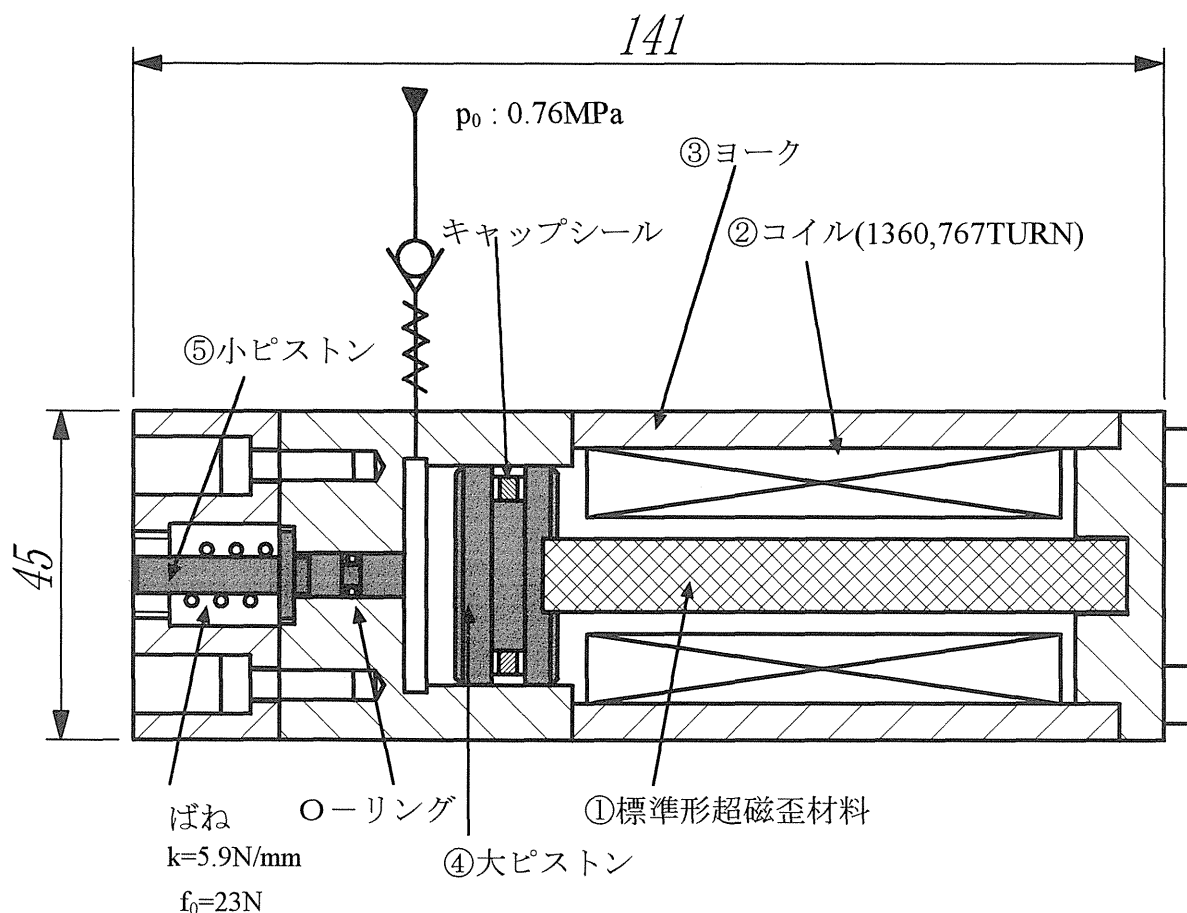


図4-8 ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1

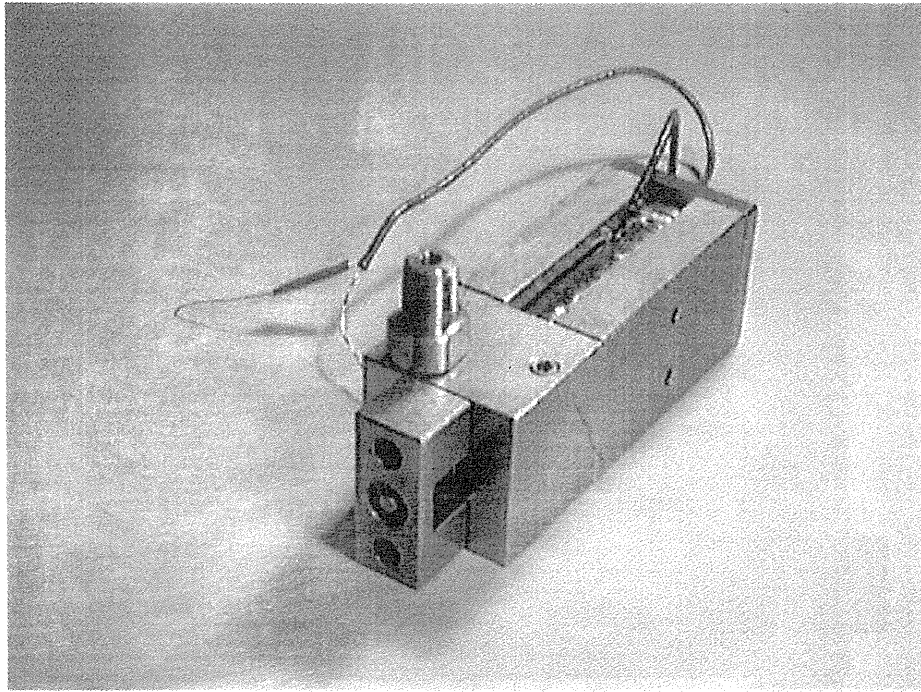


図 4 - 9 ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1

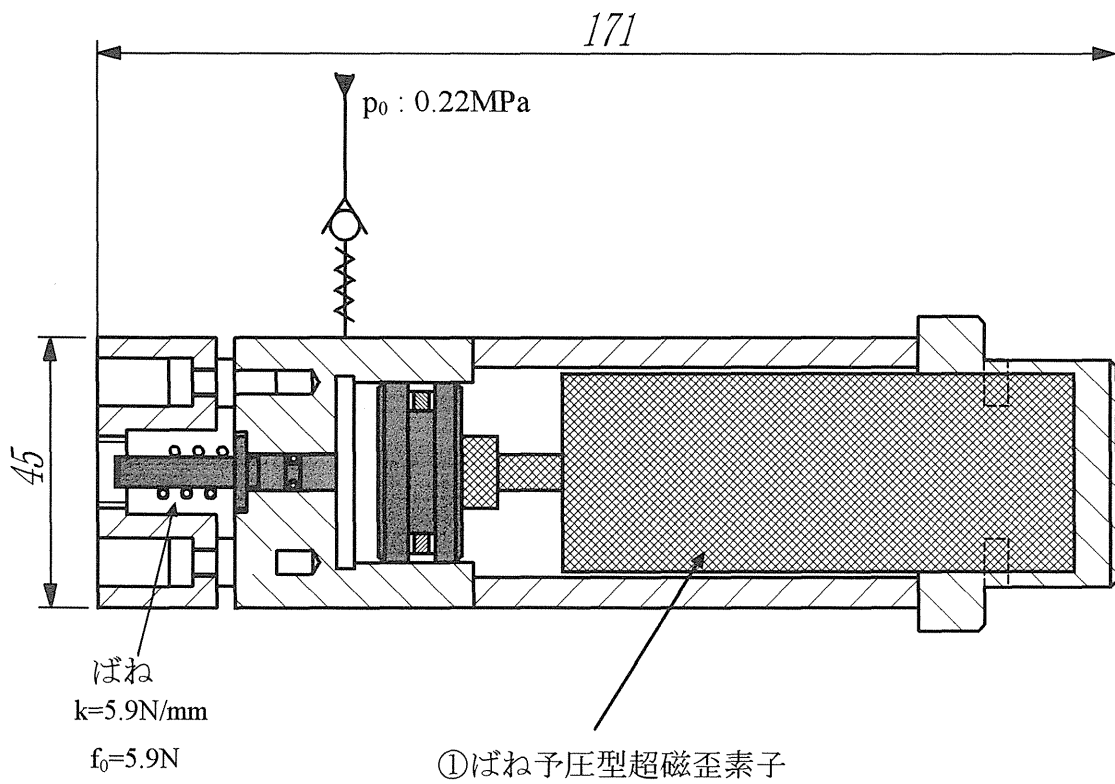


図 4 - 1 0 ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2

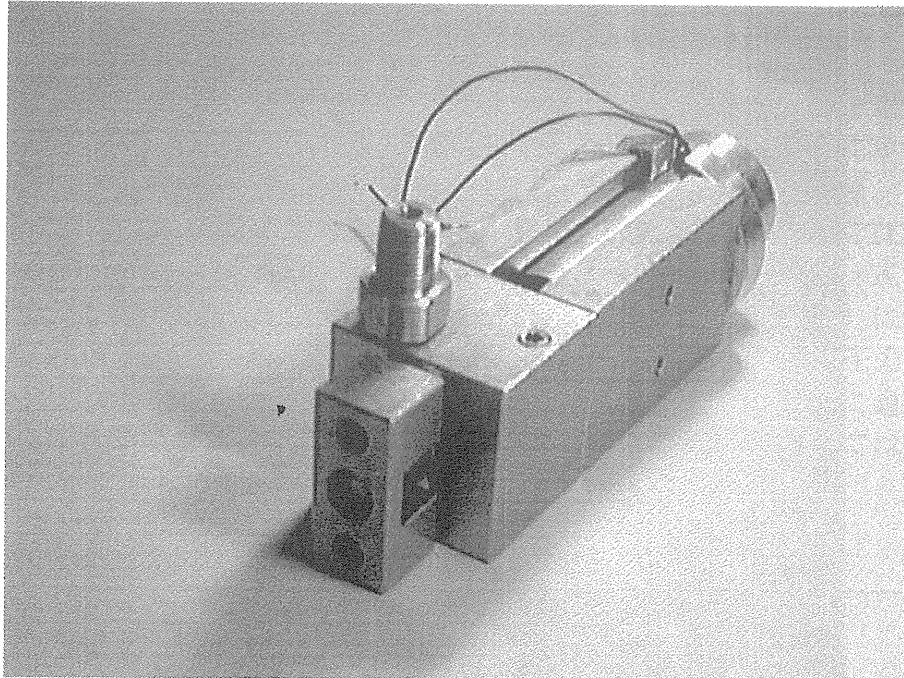
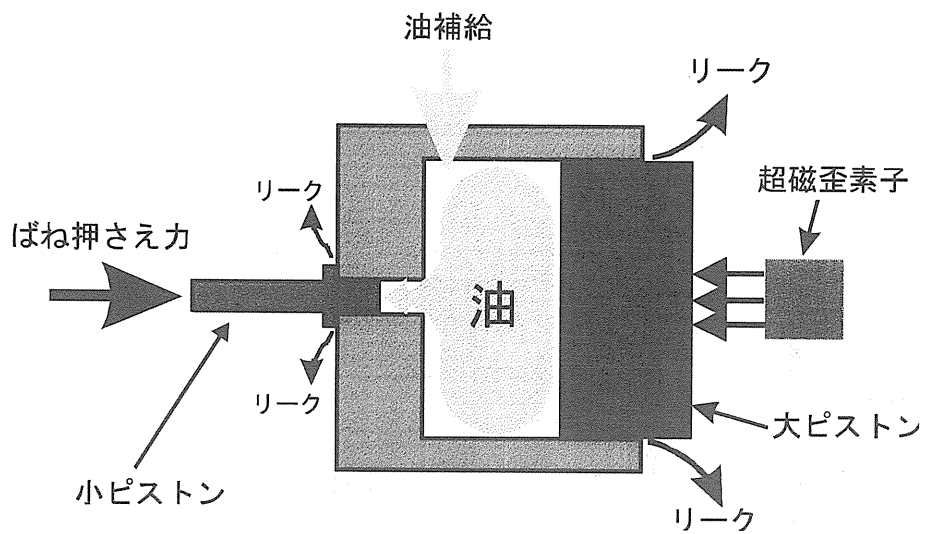


図 4 - 1 1 ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2



理論増幅率 $G = \frac{A_{PL}}{A_{PS}} = \frac{225 \pi \text{ mm}^2}{9 \pi \text{ mm}^2} = 25$

図 4 - 1 2 ピストン式増幅機構

今までのチェック弁ではチェック部はボールによって線接触で止められていたが、この構造ではわずかな寸法誤差で大きな油の逆流を発生させてしまった。そこでチェック部を図4-13のように線接触から面接触で止めるようなものに変更した。これにより以前より油の逆流は減少した。

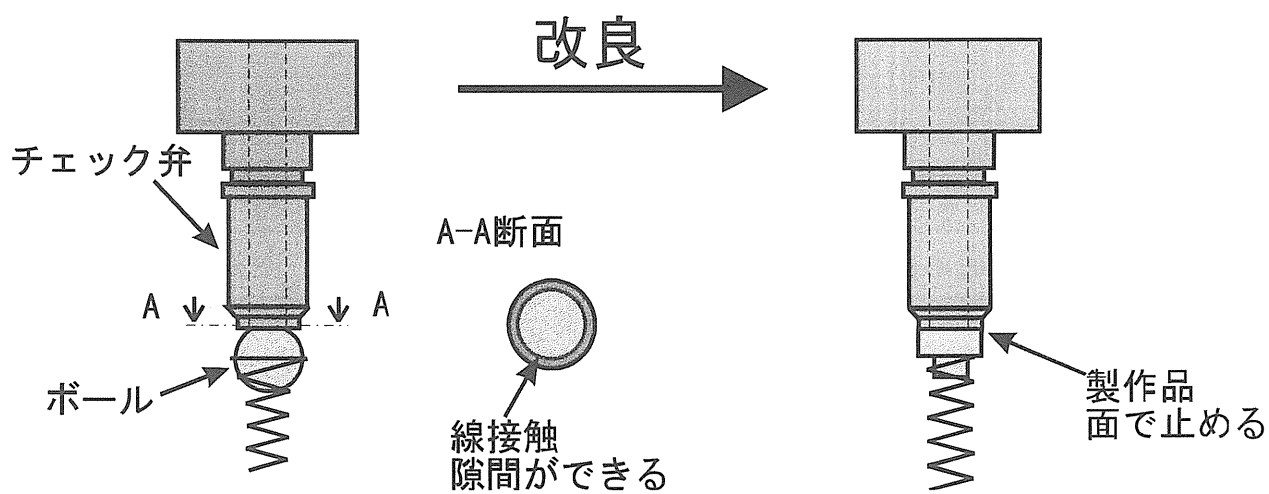


図4-13 チェック弁

〈理論特性〉

変位増幅機構の伝達関数は（４－１）式で与えられる。

$$Y(S) = \frac{\omega_n}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \cdot \frac{G}{1 + \frac{Vk}{A_{PS}^2 \beta e}} \cdot X(S) \quad (4-1)$$

ただし、

$$\omega_n = \sqrt{\frac{Vk + A_{PS}^2 \beta e}{Vm_{PS}}} \quad (4-2)$$

$$\zeta = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{V}{m_{PS}(Vk + A_{PS}^2 \beta e)}} \quad (4-3)$$

$$G = \frac{A_{PL}}{A_{PS}} \quad (4-4)$$

実際の増幅率は押さえばね反力、シール部の変形、摩擦、空気の混入による体積弾性係数の低下により、小さくなる。特に空気の混入は、固有振動数の低下を招くため注意を要する。

小ピストンの理論推力は、（４－５）式で与えられる。

$$F = A_{PS} \left\{ (A_{PL}x - A_{PS}y) \frac{\beta e}{V} + p_0 \right\} - ky - f_0 - f_f \quad (4-5)$$

4-3 ベローズ式流体増幅機構を用いた超磁歪アクチュエータ

図4-14、図4-17に設計・製作したベローズ式流体増幅機構を用いたアクチュエータの構造を示す。また、ベローズ仕様を表4-2、増幅機構の仕組みを図4-20に示す。アクチュエータ部は、①超磁歪素子（自己バイアス型超磁歪素子：図4-2参照、ばね予圧式超磁歪素子：図4-3参照）、②コイル（1360TURN：7.3Ω）、③ヨーク（SUM22）およびパスカルの原理を応用したベローズ式流体増幅機構からなる。積層型材料には皿ばねを用いて予圧縮応力（ $\sigma_0=0.76\text{MPa}$ ）を作用させる。なお、ばね予圧式超磁歪素子はコイルおよび予圧縮応力を作用させる皿ばねが内部にある。ベローズ式流体増幅機構には、あらかじめ真空ポンプを用いて空気抜きをしたVG32相当作動油を完全に密封してあるので、外部への漏れは無い。またベローズ端面に超磁歪素子から負荷がかかったとき、ベローズ自体が傾いてしまうのを防ぐため大ピストンとガイドを取り付けた（図4-21参照）。

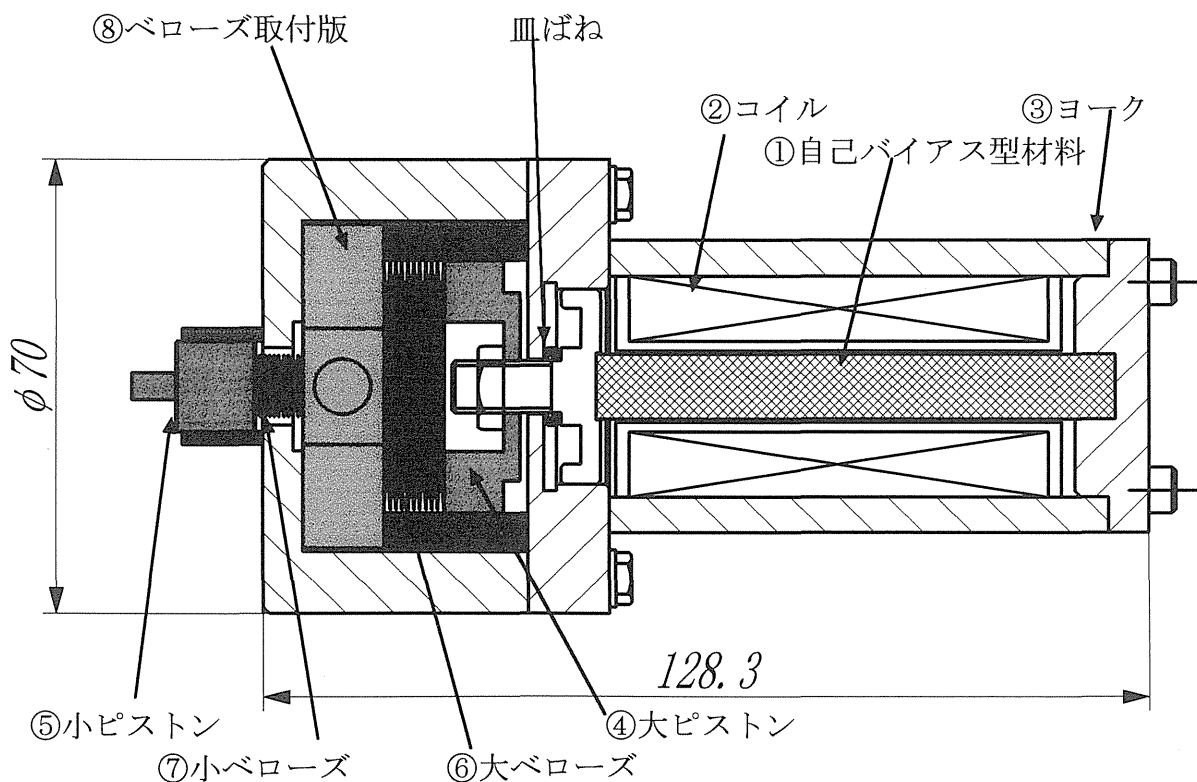


図4-14 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.1

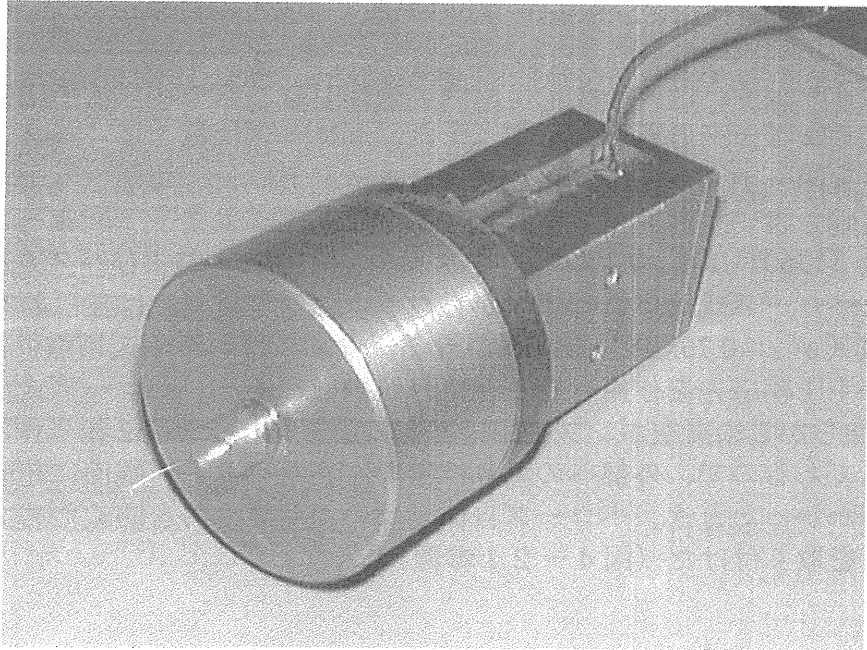


図 4 - 1 5 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.1

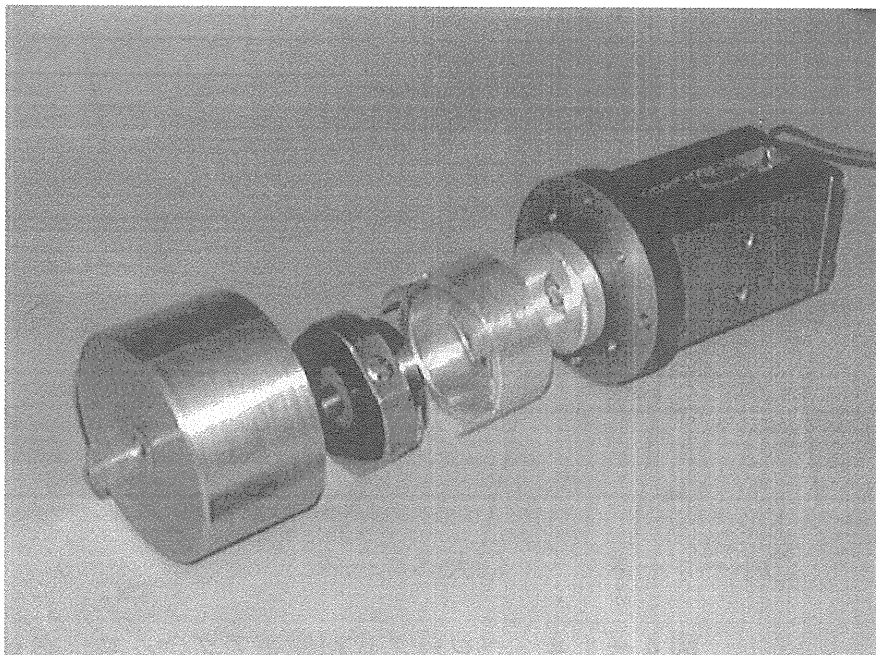


図 4 - 1 6 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.1 分解図

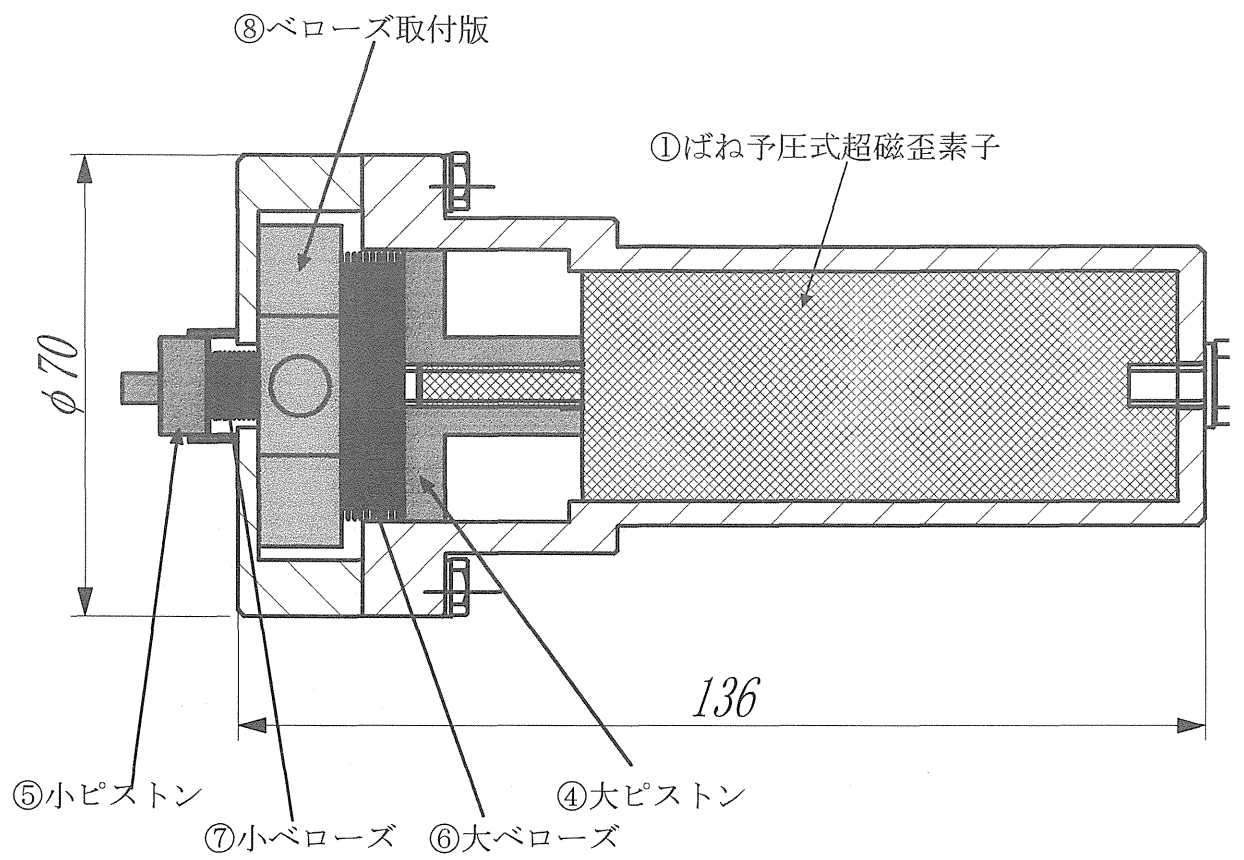


図4-17 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.2

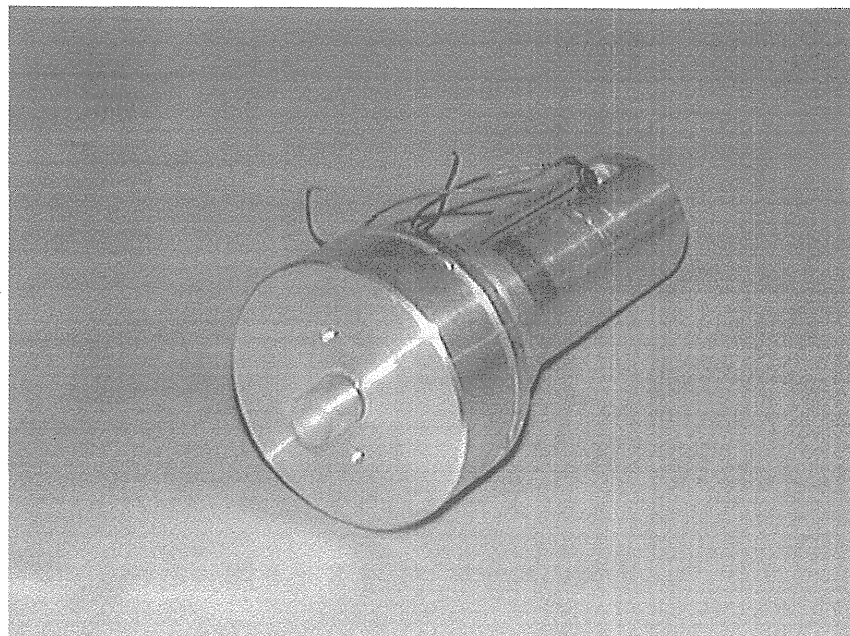


図4-18 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.2

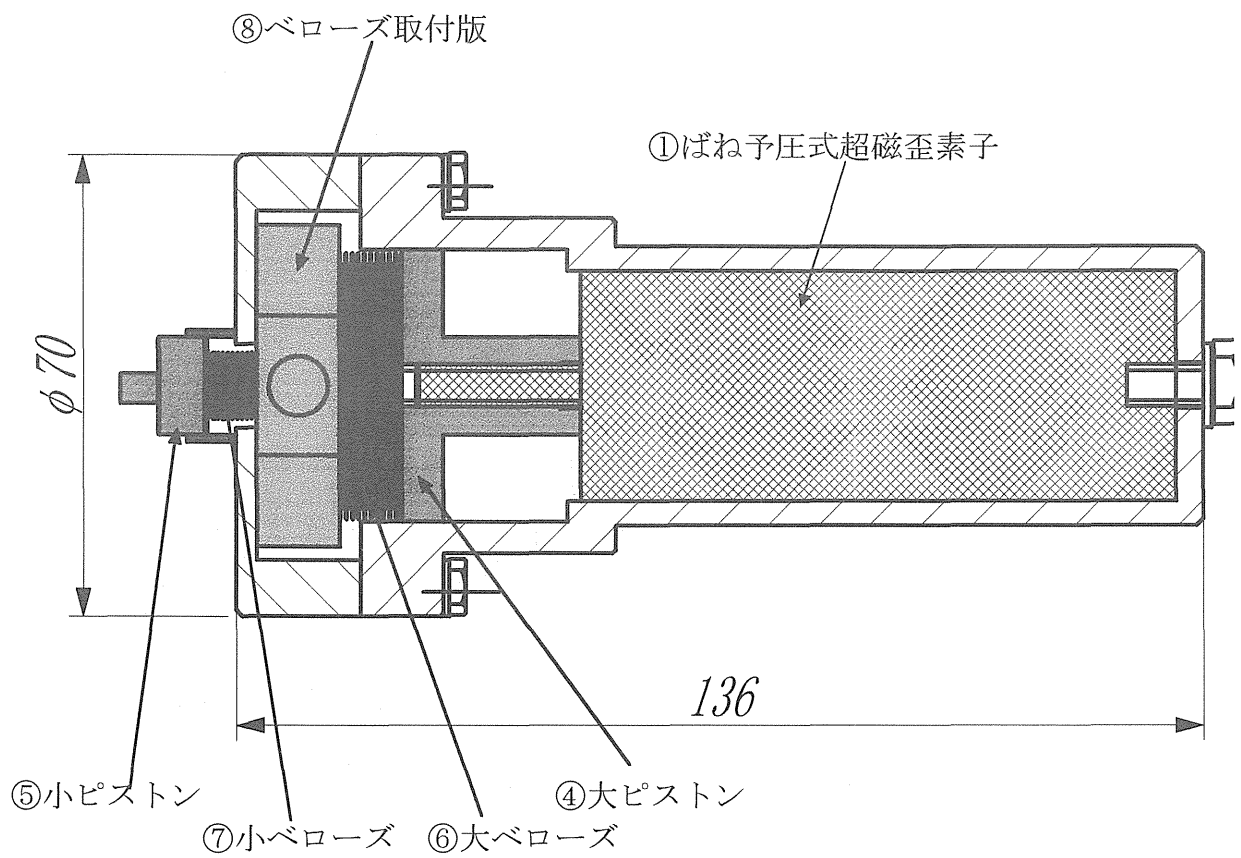


図4-17 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.2

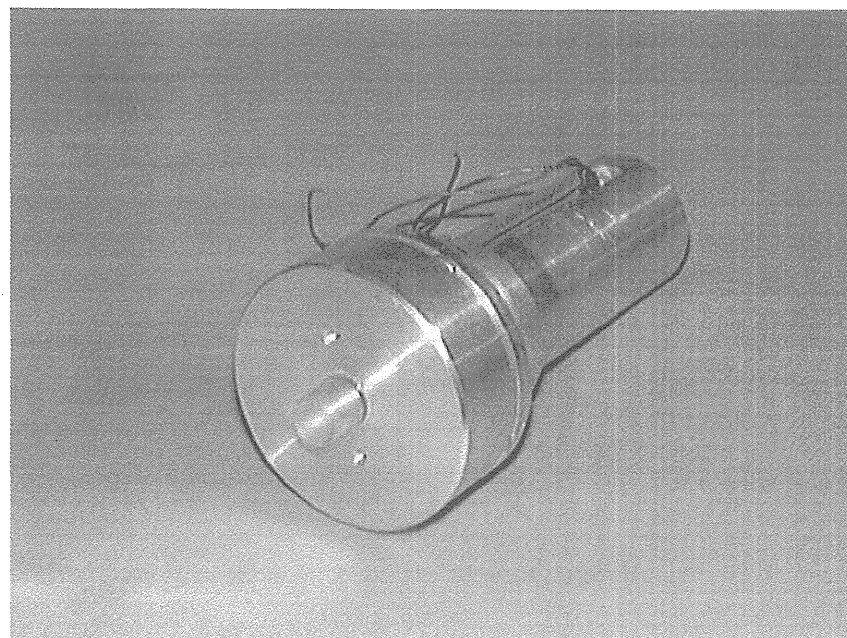


図4-18 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.2

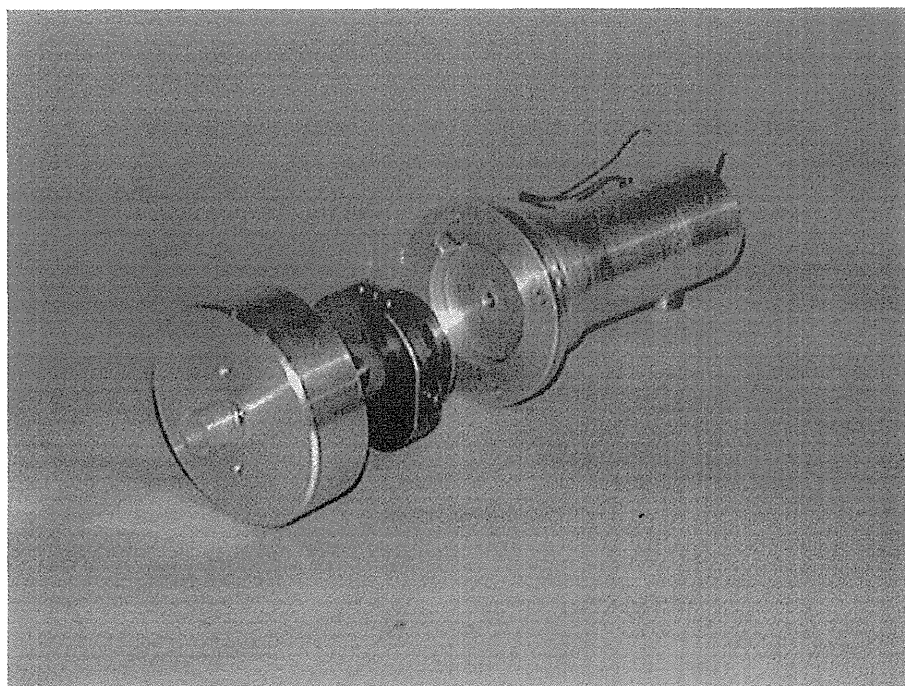
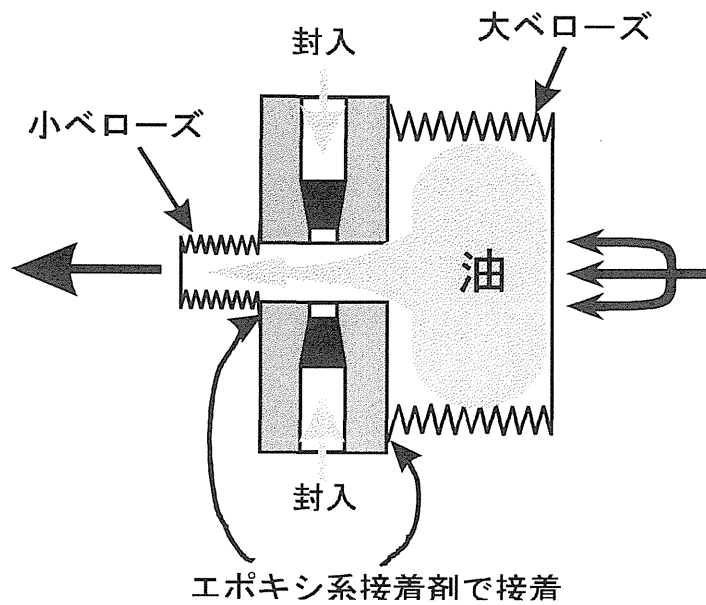


図4-19 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.2 分解図

表4-2 ベローズ仕様

	大ベローズ	小ベローズ
コンボリューション数(山数)	12	10
外径	38.1mm	9.5mm
内径	24.6mm	3.2mm
有効面積	7.68cm ²	0.316cm ²
最大外部圧力	276kPa	689kPa
最大作動長	10.9mm	5.3mm
圧縮長	3.6mm	1.8mm
ばね定数	3.9N/mm	2.3N/mm



理論増幅率 $G = \frac{A_{BL}}{A_{BS}} = \frac{7.68\text{cm}^2}{0.316\text{cm}^2} = 24$

図4-20 ベローズ式増幅機構

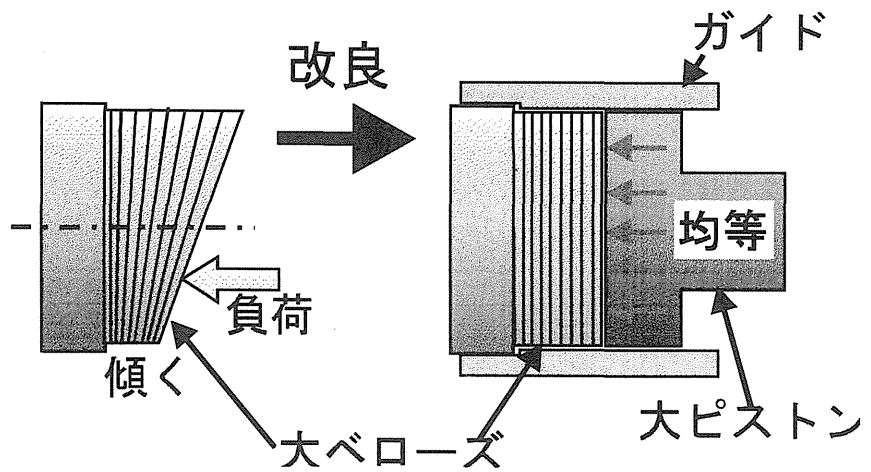
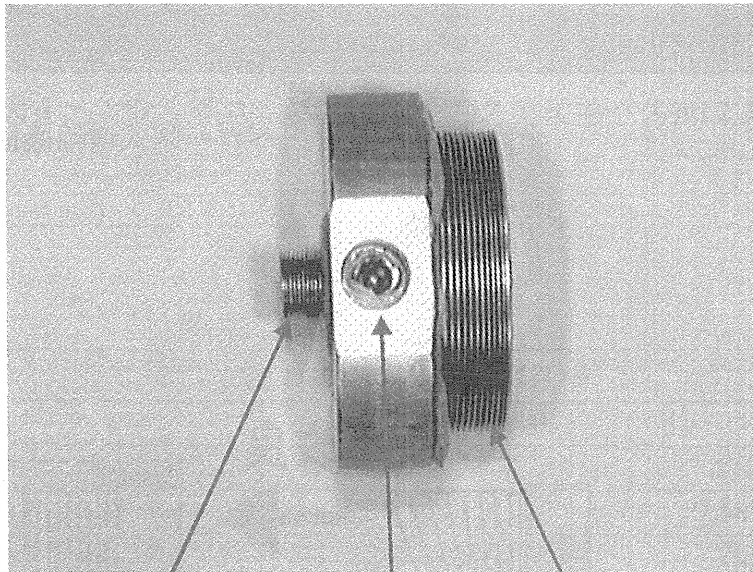
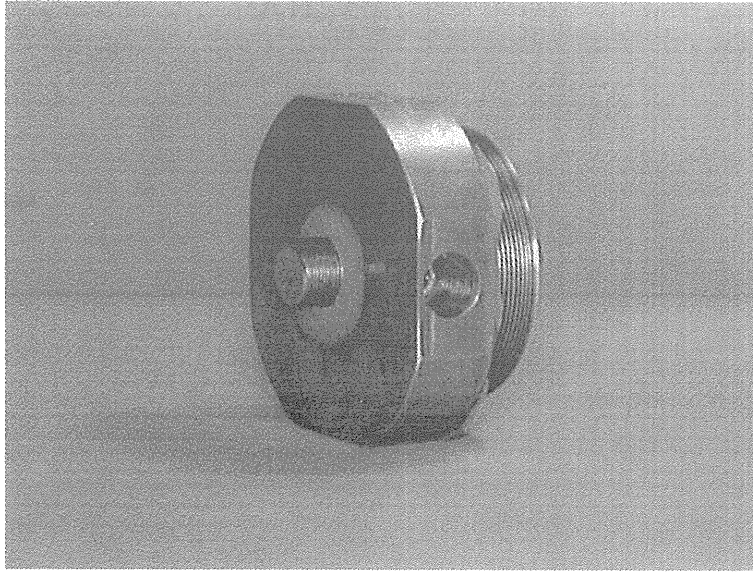


図4-21 ベローズの動作



小ベローズ

大ベローズ

流体封入口

図 4 - 2 2 ベローズ式増幅機構

〈理論特性〉

変位増幅機構の伝達関数は（４－６）式で与えられる。

$$Y(S) = \frac{\omega_n}{S^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \cdot \frac{G}{1 + \frac{VK_S}{A_{BS}^2 \beta e}} \cdot X(S) \quad (4-6)$$

ただし、

$$\omega_n = \sqrt{\frac{VK_S + A_{BS}^2 \beta e}{V \cdot \left(\frac{1}{3}m_{BS} + M\right)}} \quad (4-7)$$

$$\zeta = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{V}{\left(\frac{1}{3}m_{BS} + M\right) \cdot (VK_S + A_{BS}^2 \beta e)}} \quad (4-8)$$

$$G = \frac{A_{BL}}{A_{BS}} \quad (4-9)$$

実際の増幅率はベローズ反力、摩擦、空気の混入による体積弾性係数の低下により、小さくなる。特に空気の混入は、固有振動数の低下を招くため注意を要する。小ベローズの理論推力は、（４－１０）式で与えられる。

$$F = A_{BS} \left\{ (A_{BL}x - A_{BS}y) \frac{\beta e}{V} + p_0 \right\} - K_S y - K_S y_0 - f_f \quad (4-10)$$

小ベローズを圧縮した状態を初期状態に設定すれば p_0 は増加し、推力は大きくなる。

第5章 ピストン式超磁歪アクチュエータの 特性評価

5-1 磁場（電流）－変位特性の静特性の測定

5-1-1 測定装置

図5-1に、ピストン式超磁歪アクチュエータの磁場（電流）－変位特性の静特性の測定に用いた装置の略図を示す。アクチュエータはピストン式超磁歪アクチュエータ no.1（1360TURN、767TURN）とピストン式超磁歪アクチュエータ no.2である。

5-1-2 測定方法

アクチュエータの駆動電流を変化させたときの変位特性の静特性を以下の手順で行う。

- ① 図5-1のように設置する。
- ② ピストン間に作動油を封入し油圧（ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1：0.76MPa、ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2：0.22MPa）をかける。
- ③ アクチュエータの駆動電流を0Aから上げていき、一定電流に達した後再び0Aまで下げていく。この時X軸に電流値、Y軸に変位が測れるようにX－Yプロッタに接続する。

5-1-3 測定結果

実験の測定結果を図5-2、5-3、5-4に示す。

5-1-4 考察

実験結果の図はどれも超磁歪素子の磁歪曲線と似た形をしている。従って超磁歪素子の磁歪変位が小ピストンに確実に伝えられていることがわかる。またどのアクチュエータにも大きなヒステリシスが見られるが、これは超磁歪素子自体のヒステリシス特性プラス小ピストンの摩擦抵抗の影響と考えられる。

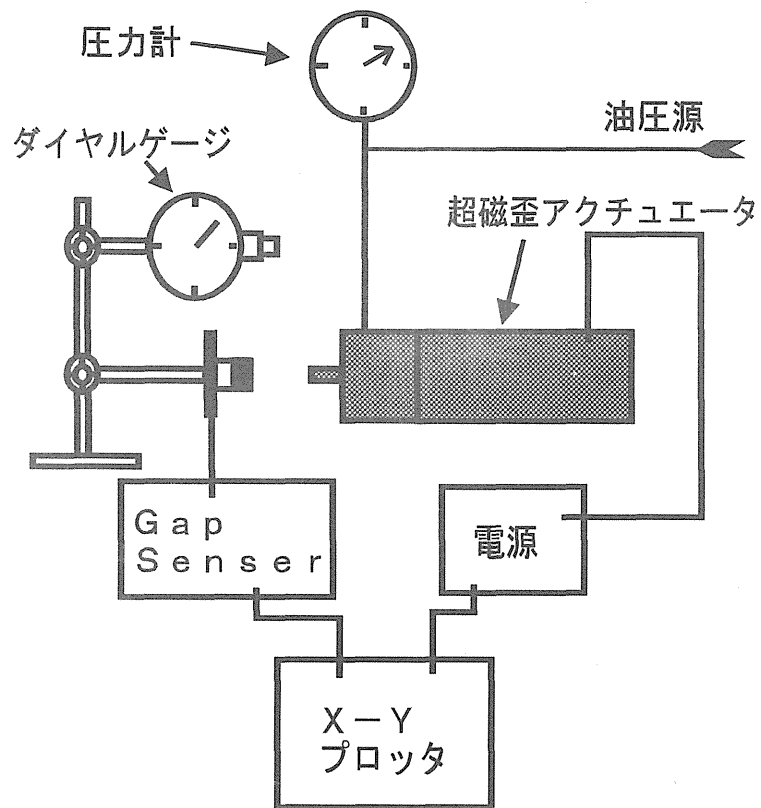


図5-1 ピストン式超磁歪アクチュエータ
磁場（電流）-変位特性の静特性の測定

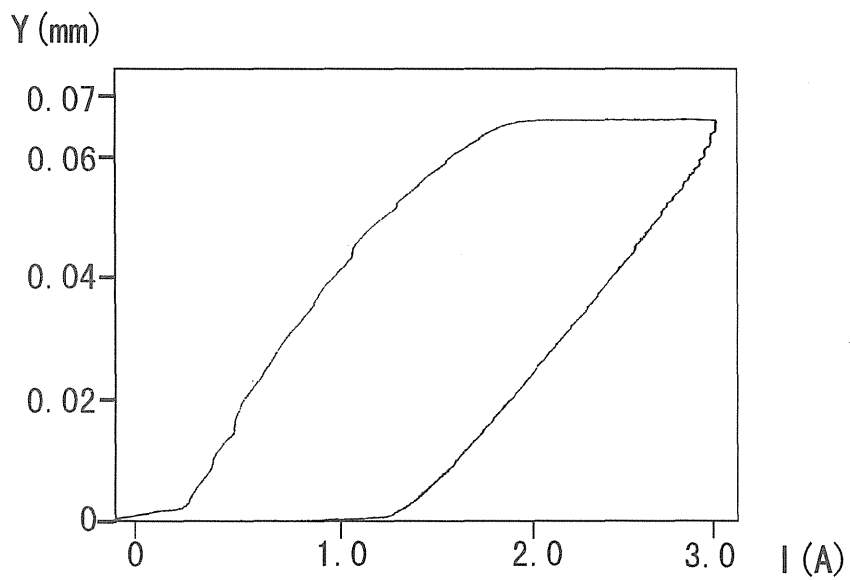


図5-2 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN)

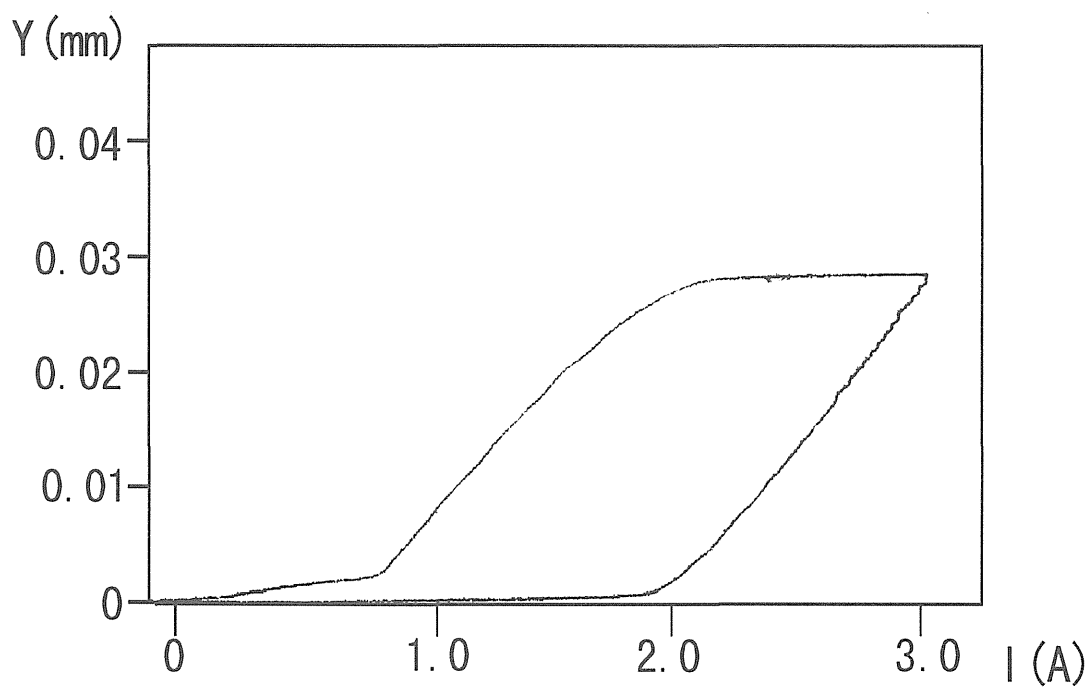


図5-3 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (767TURN)

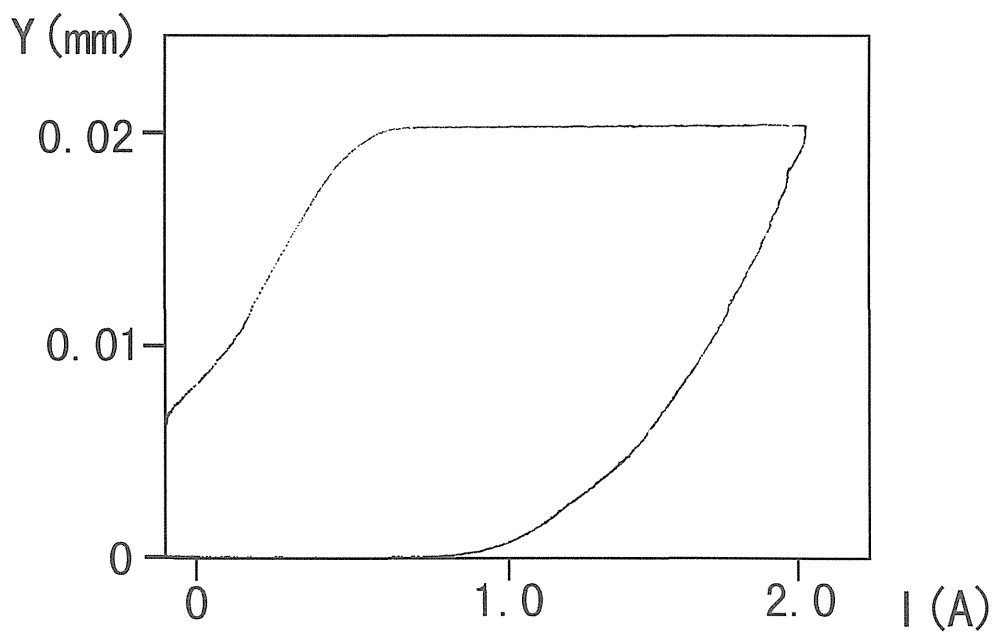


図5-4 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2

5-2 磁場（電流）－変位出力特性の静特性の測定

5-2-1 測定装置

図5-5に、ピストン式超磁歪アクチュエータの磁場（電流）－変位出力特性の静特性の測定に用いた装置の略図を示す。アクチュエータの変位はギャップセンサで、出力はロードセルを用いて測定する。図のようにアクチュエータは固定し、ハンドルの付いた動く台座にロードセルを取付け、ハンドルを回して台座を動かしたときロードセルとアクチュエータの小ピストンが当たるように設置する。

5-2-2 測定方法

アクチュエータの駆動電流を一定にしたときの磁場（電流）－変位出力特性の静特性の測定を以下の手順で行う。

- ① 図5-5のように設置する。
- ② ハンドルを回して台座を動かしたときロードセルとアクチュエータの小ピストンが当たるように設置する。
- ③ ピストン間に作動油を封入し油圧（ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1：0.76MPa、ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2：0.22MPa）をかける。
- ④ ロードセルのロードボタンにアクチュエータの小ピストンの先端を接触させ、そこを基準点とする。再び、ロードボタンから小ピストンを離す。
- ⑤ 定電流源を用いて、アクチュエータを一定電流で駆動する。
- ⑥ ハンドルを回してロードボタンを小ピストンに接触させて X-Y プロッタの目盛りが基準線まできたら、ロードボタンを小ピストンから離す。この時 X 軸に力、Y 軸に変位が測れるように X-Y プロッタに接続する。
- ⑦ 駆動電流を変えて同手順で行う。

5-2-3 測定結果

実験の測定結果を図5-6、5-7、5-8に示す。

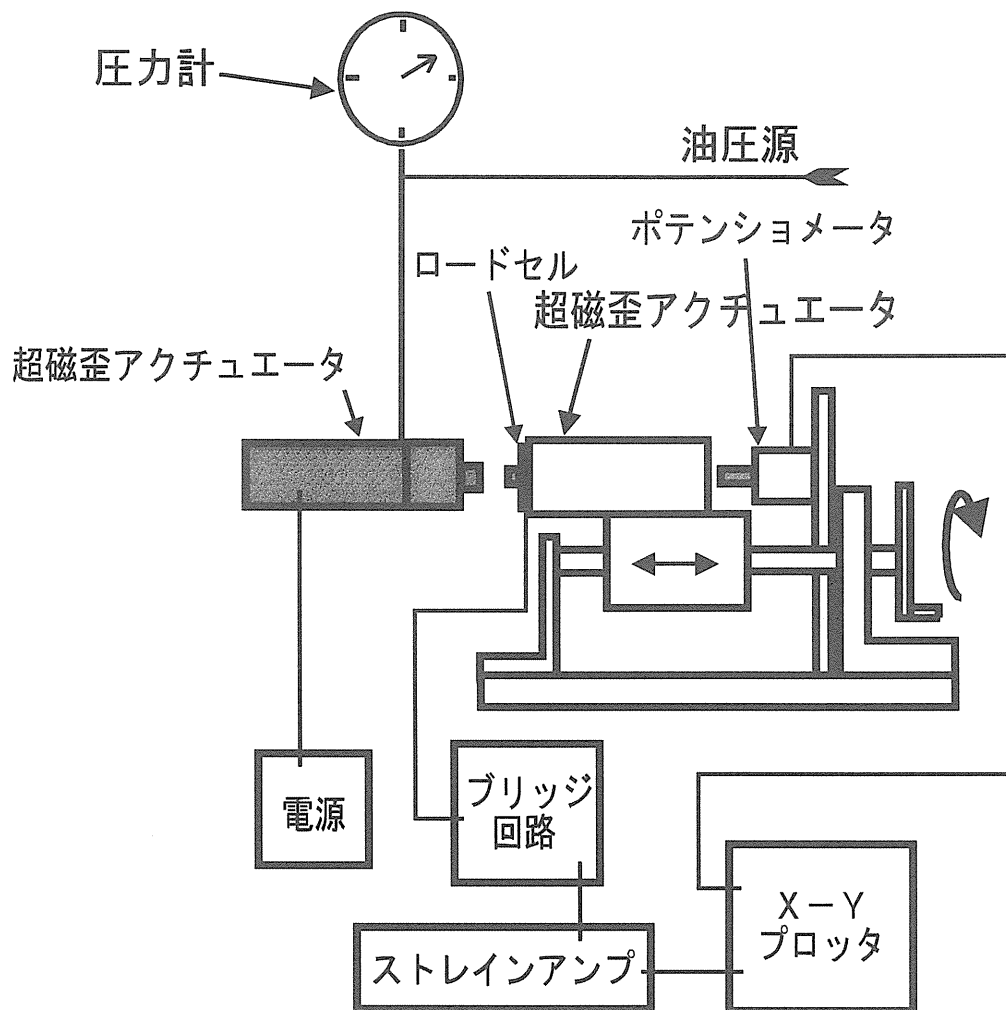


図5-5 ピストン式超磁歪アクチュエータ
磁場（電流）-変位出力特性の静特性の測定

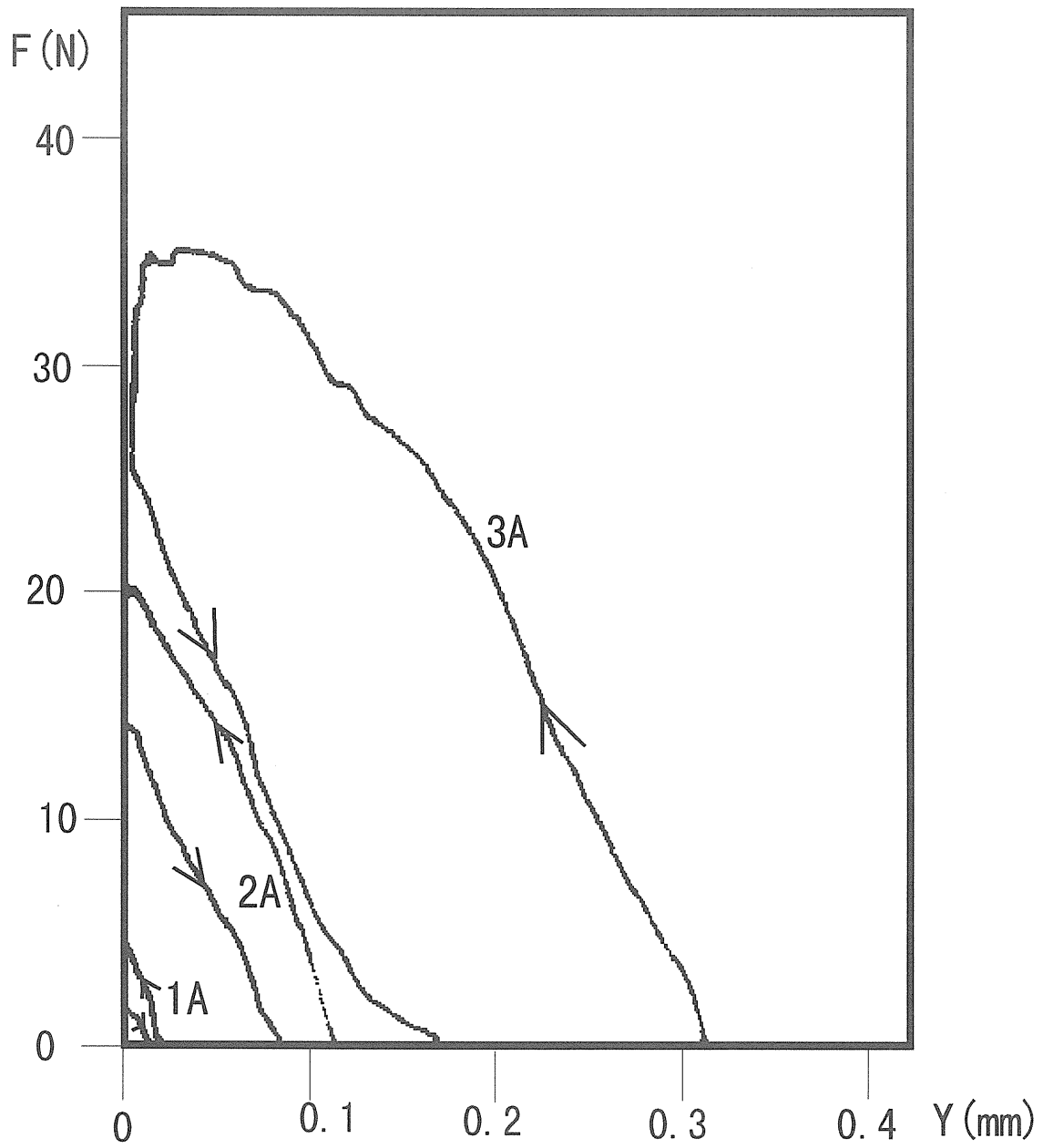


図 5 - 6 ピストン式超磁歪アクチュエータno. 1 (1360TURN)

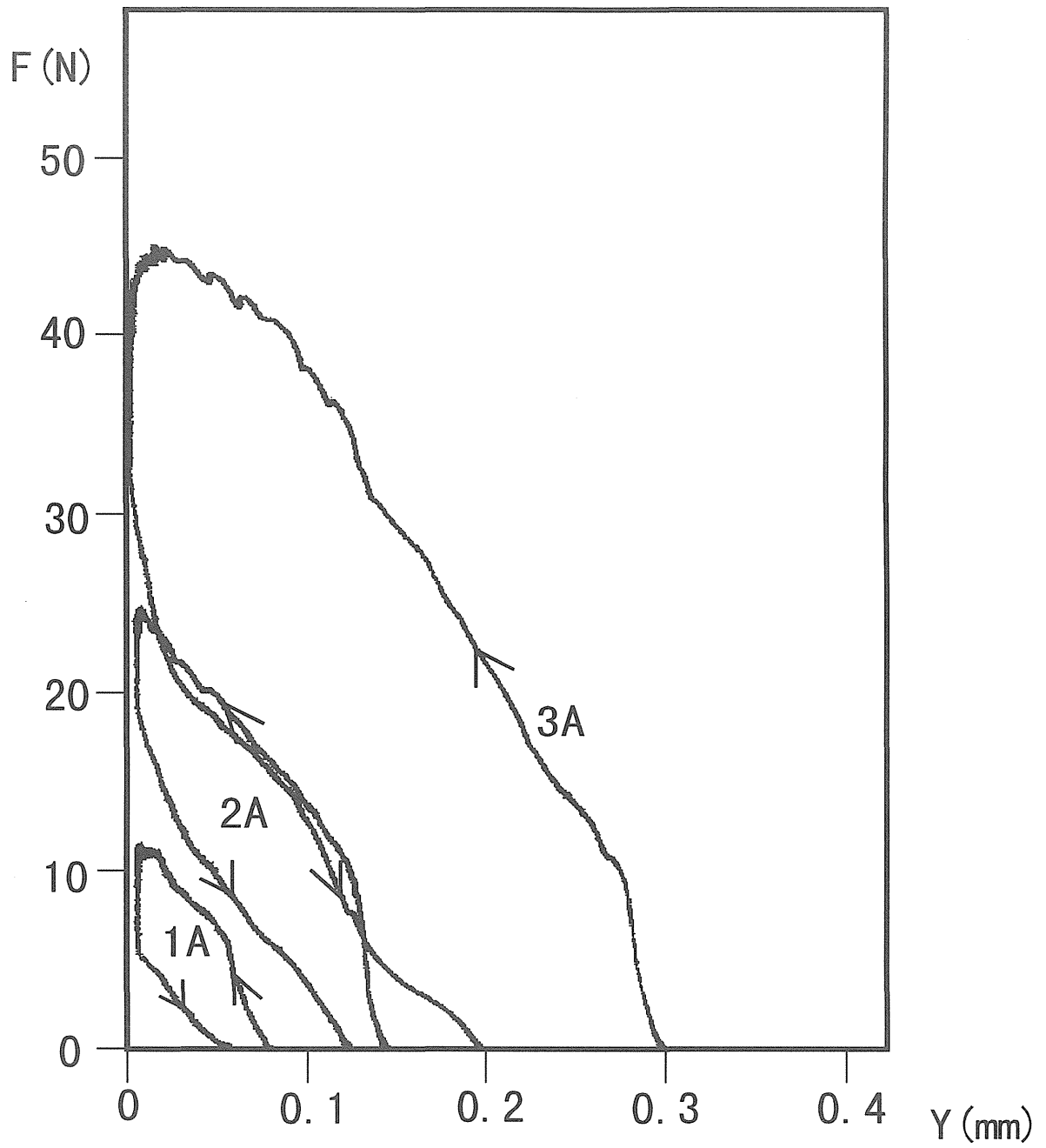


図5-7 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (767TURN)

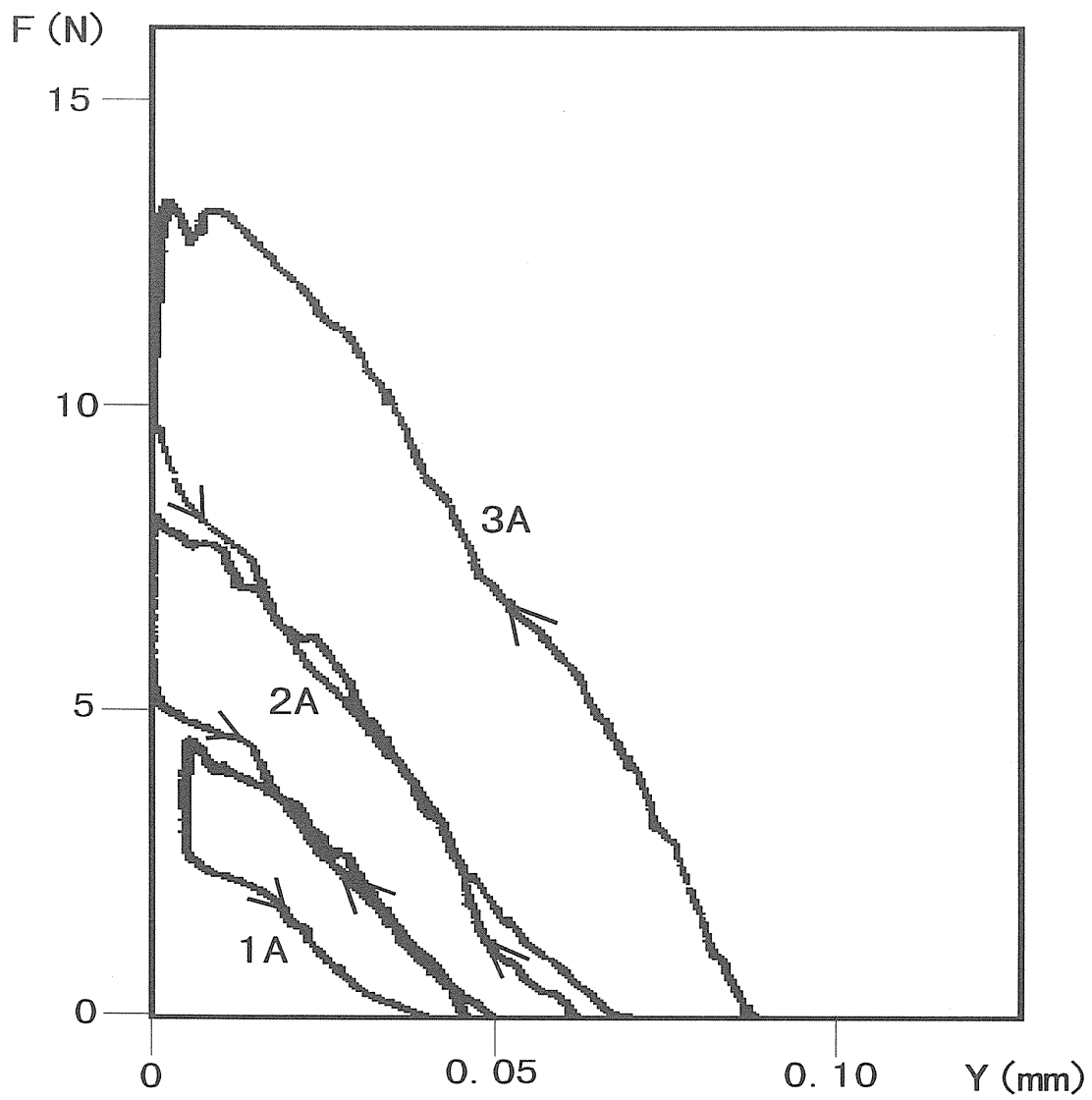


図5-8 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2

5-2-4 考察

各図とも変位が増すにつれて出力は減少している。

また従来の超磁歪素子を用いた場合と比べ、ばね予圧式超磁歪素子を用いたアクチュエータでは出力、変位ともに小さい。これはばね予圧式超磁歪素子は既にプレストレスがかけられていて出力も 220N であることを考え、油圧を 0.22MPa と低く設定したため、気泡を含んだ内部流体の圧縮が大きかったためである。

ロードボタンをピストンに近づけるときより離すときの方が出力が小さい理由は、ロードボタンをピストンに押しつける際に油のリークが生じるためと思われる。

5-3 磁場（電流）－変位出力特性の動特性の測定

5-3-1 測定装置

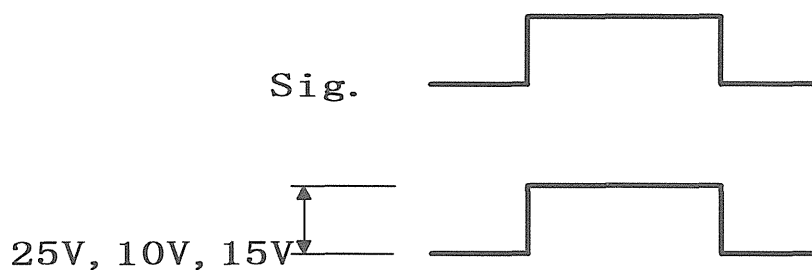
図5-9、図5-10に、測定に用いた装置の略図を示す。図のように従来のドライバーおよび高速ドライバーを取付け、関数発生器によりアクチュエータのステップ応答、周波数応答による動特性の測定を行う。アクチュエータの変位はギャップセンサを用いて測定する。

5-3-2 測定方法

I. 従来のドライバー（定電圧電源）を用いた磁場（電流）－変位出力特性の動特性の測定

以下の手順で行う。

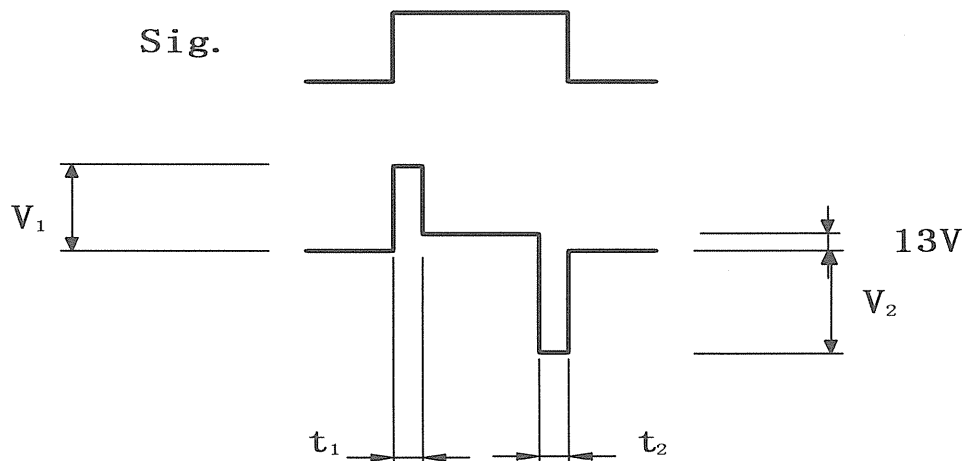
- ① 図5-9のように設置する。
- ② ピストン間に作動油を封入し油圧（ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1 : 0.76MPa、ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2 : 0.22MPa）をかける。
- ③ 関数発生器を最初に低周波にする。
- ④ 定電圧電源を用いて、アクチュエータを一定電圧（ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1 1360TURN : 25V、767TURN : 10V、ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2 : 15V）で駆動する。そして下図のような信号波を送る。
- ⑤ オシロスコープのトリガー機能を使ってギャップセンサから変位の波形を取り込み、X-Yプロッタでデータを取る。
- ⑥ そのときのアクチュエータの変位と応答性を波形から算出する。
- ⑦ 周波数を変えて測定を行う。



II. 高速ドライバーを用いた磁場（電流）－変位出力特性の動特性の測定

以下の手順で行う。

- ① 図 5－9 のように設置する。
- ② ピストン間に作動油を封入し油圧（ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1 : 0.76MPa、ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2 : 0.22MPa）をかける。
- ③ 下図のような信号波を送る。
- ④ 以下 I. と同手順で行う。



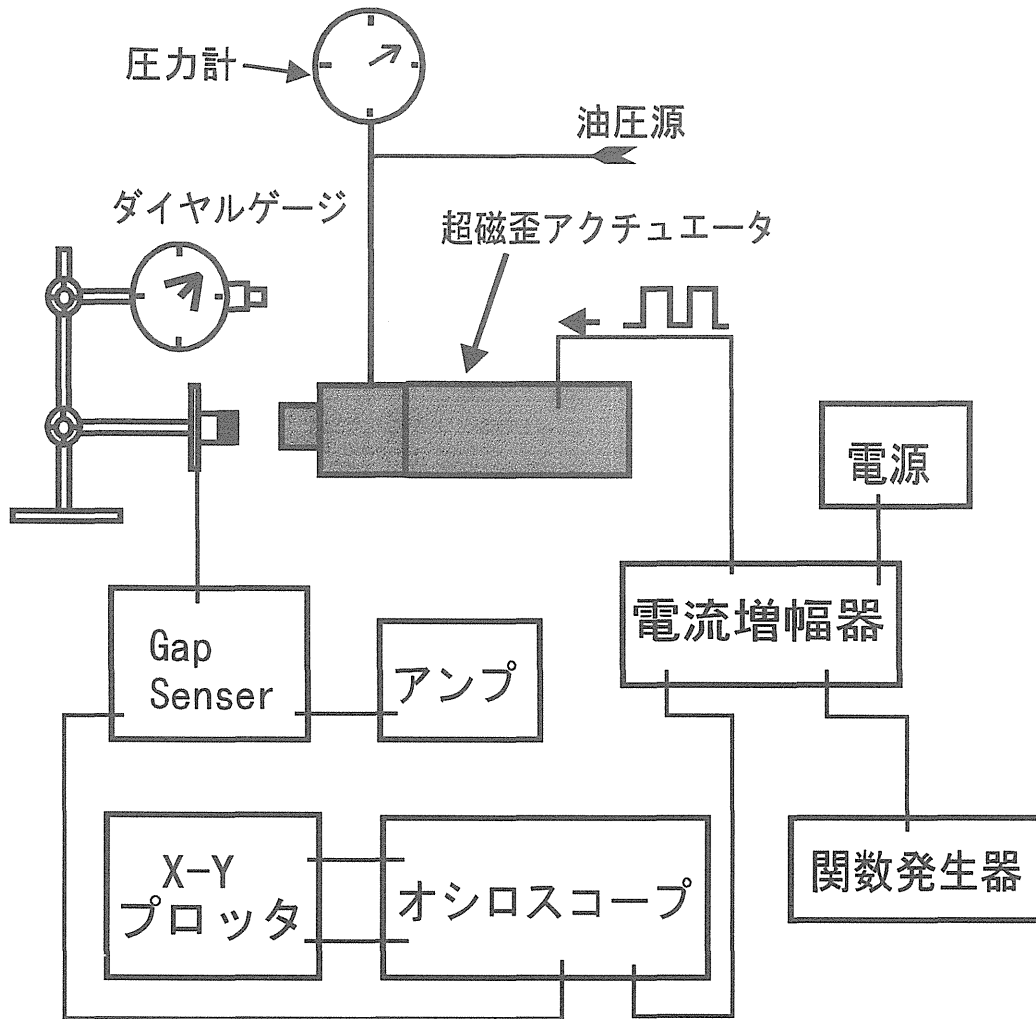


図5-9 ピストン式超磁歪アクチュエータ
 磁場（電流）-変位出力特性の動特性の測定
 （従来のドライバー）

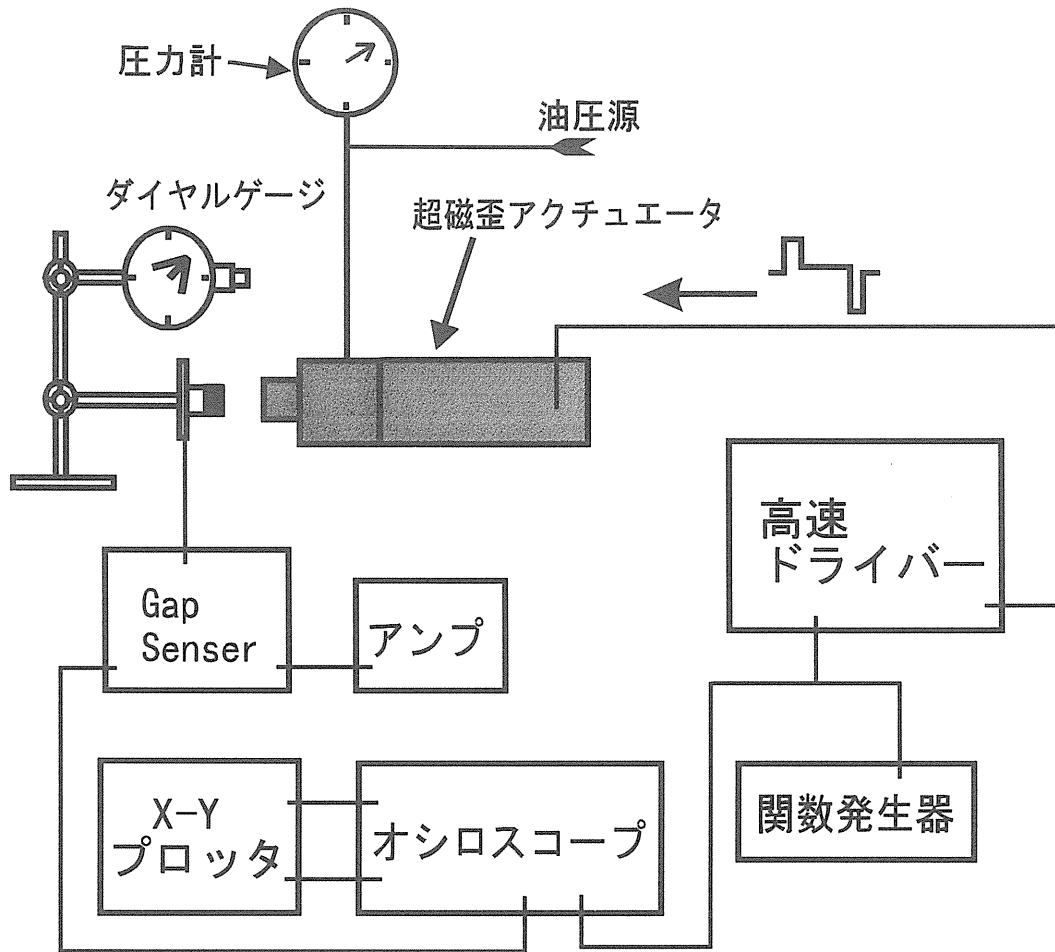


図5-10 ピストン式超磁歪アクチュエータ
磁場（電流）→変位出力特性の動特性の測定
（高速ドライバー）

5-3-3 測定結果

実験の測定結果を図5-11～図5-30に示す。

アクチュエータ		ドライバー	図番号
no.1	1360TURN	従来	図5-11～図5-14
		高速	図5-19～図5-22
	767TURN	従来	図5-15～図5-18
	no.2	従来	図5-23～図5-26
高速		図5-27～図5-30	

図5-11 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN)
従来のドライバー (25V)

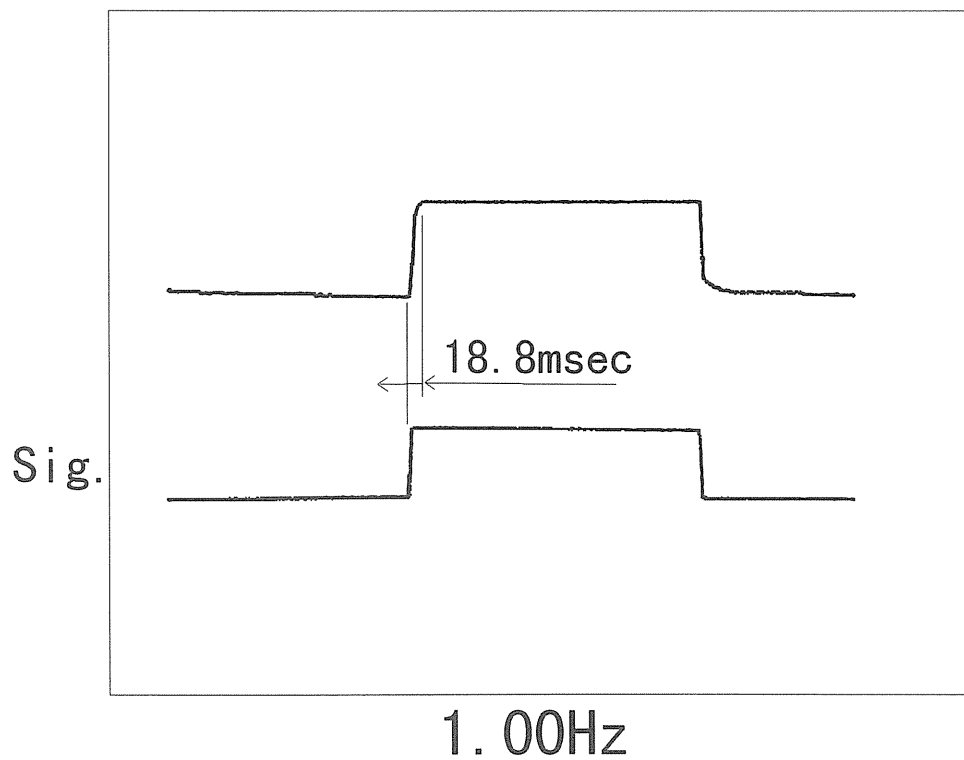
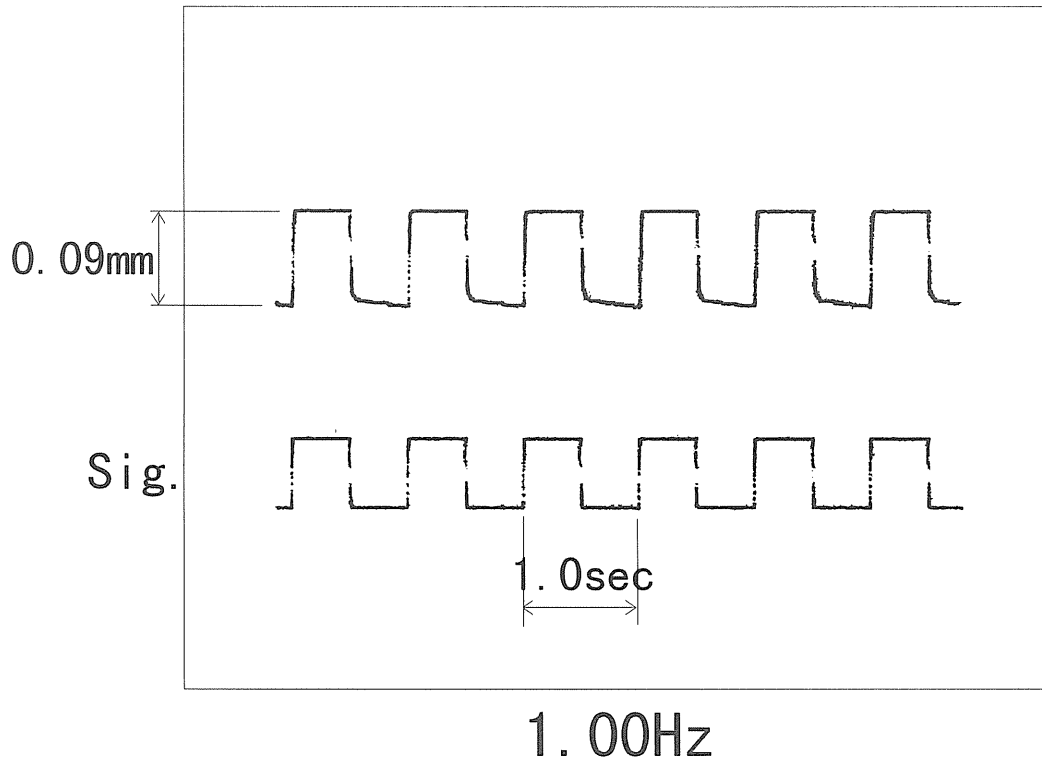


図5-12 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN)
従来のドライバー (25V)

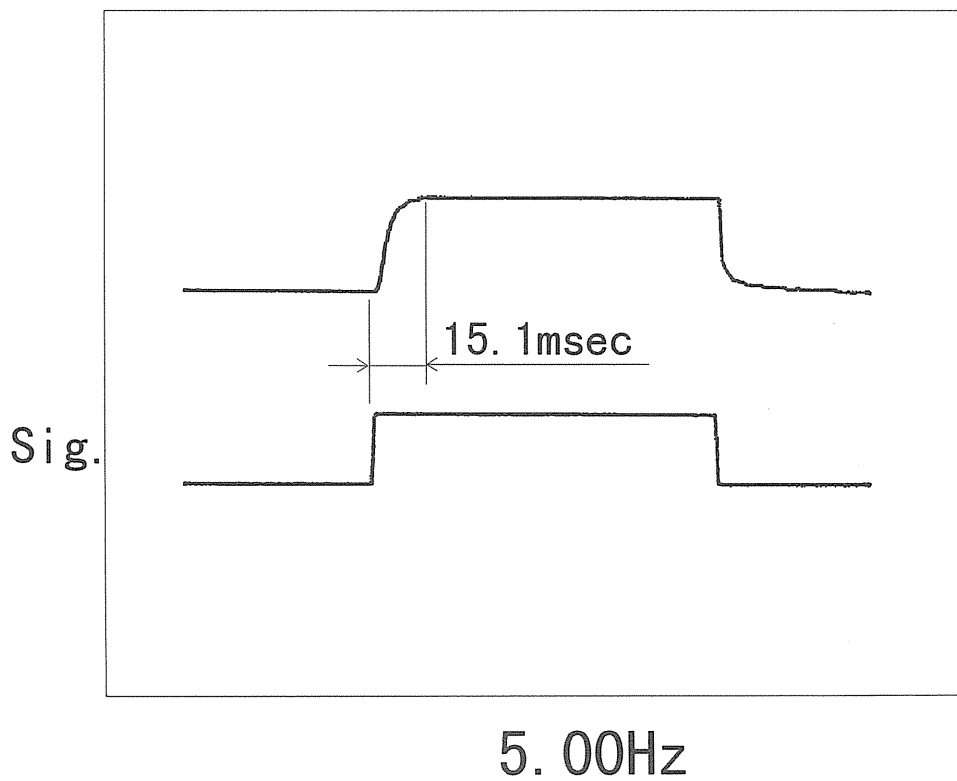
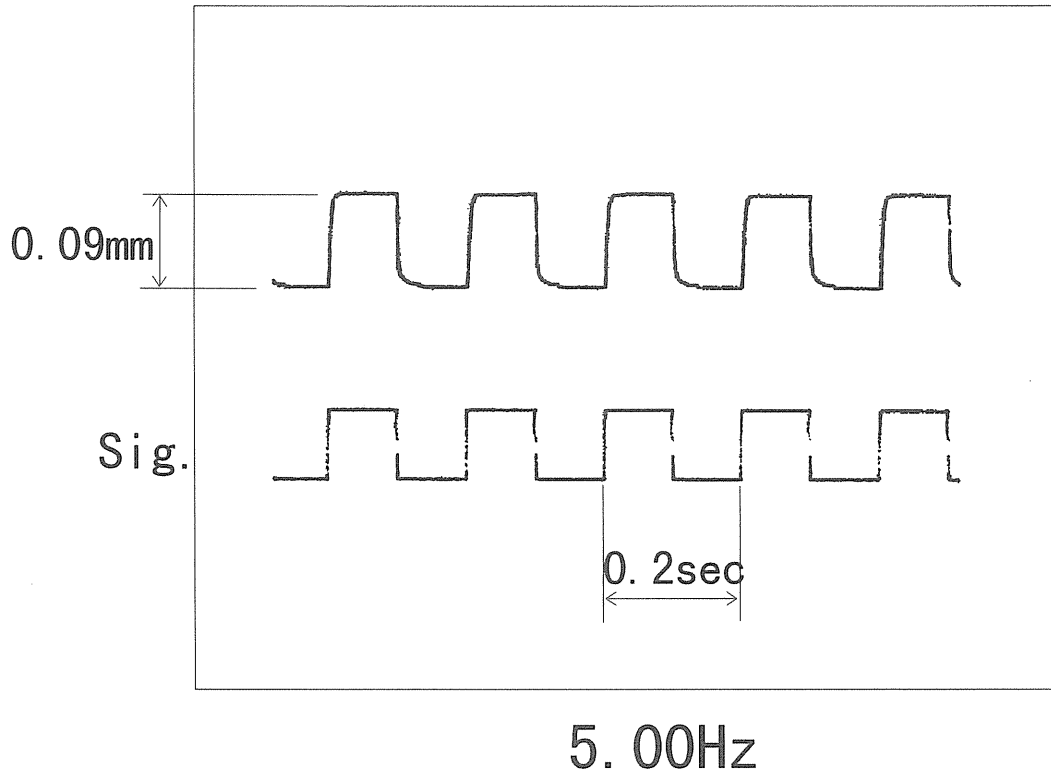


図5-13 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN)
従来のドライバー (25V)

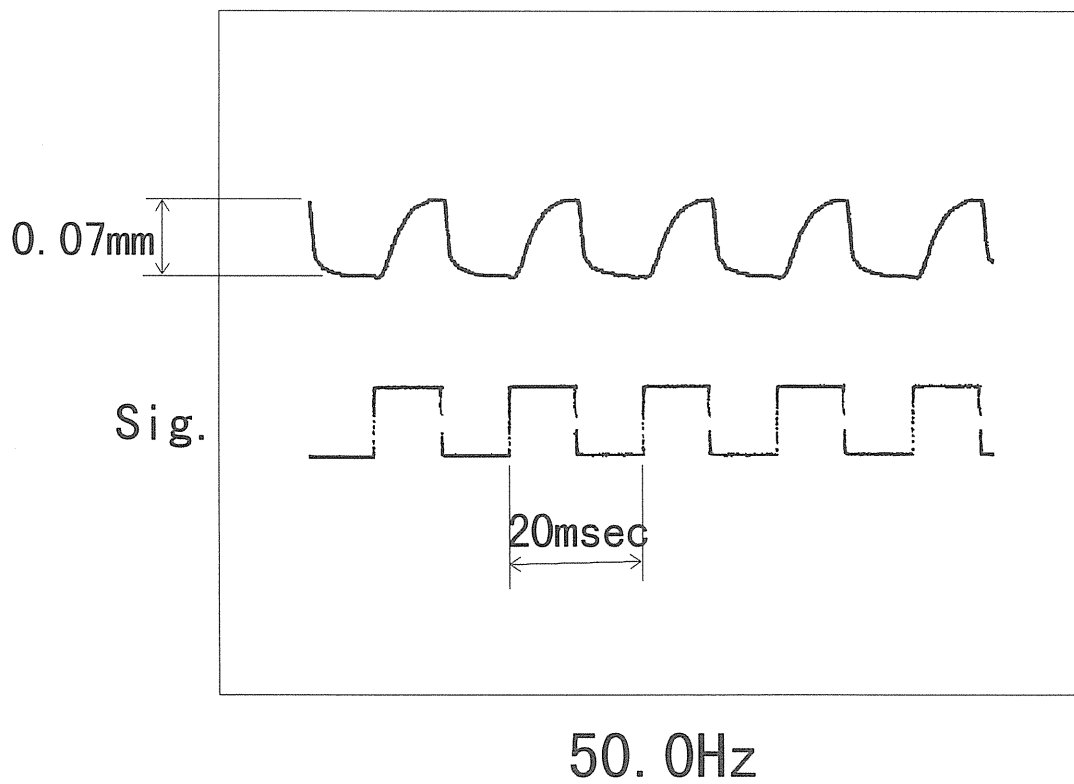
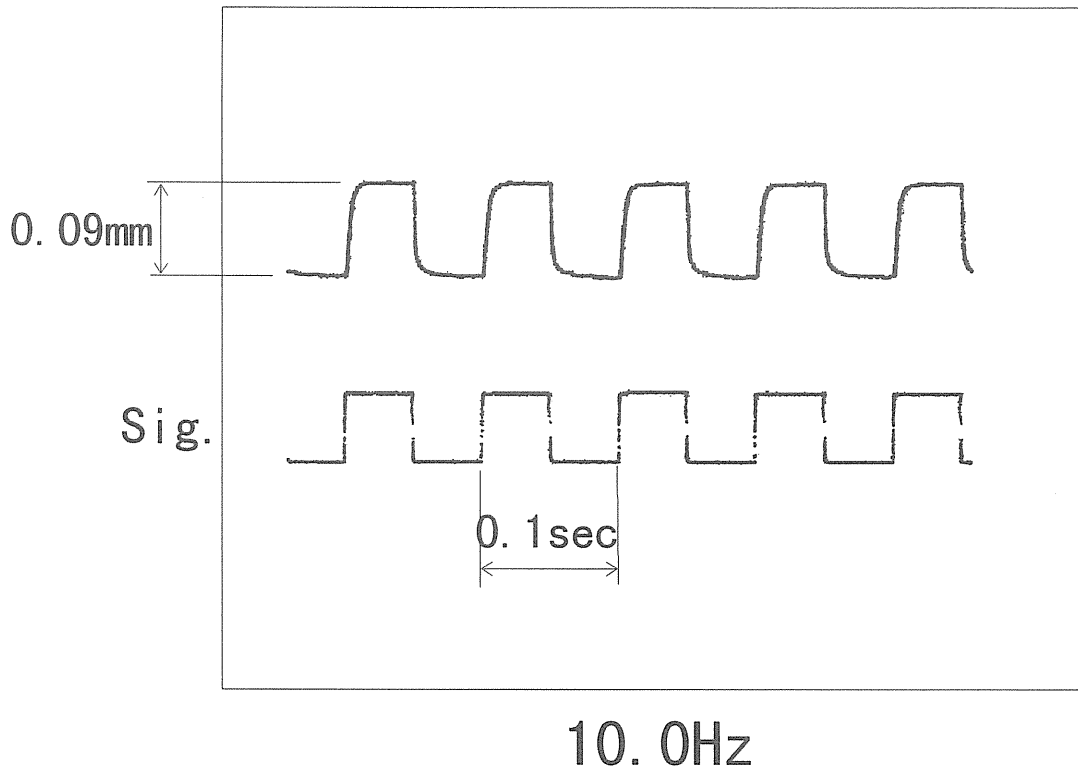
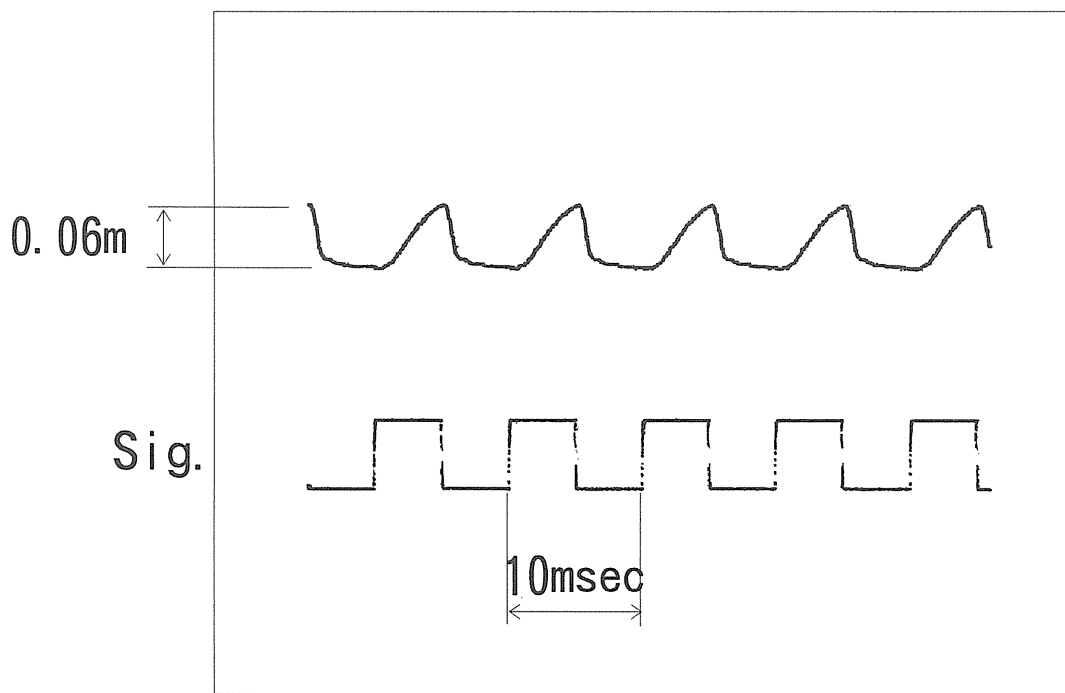
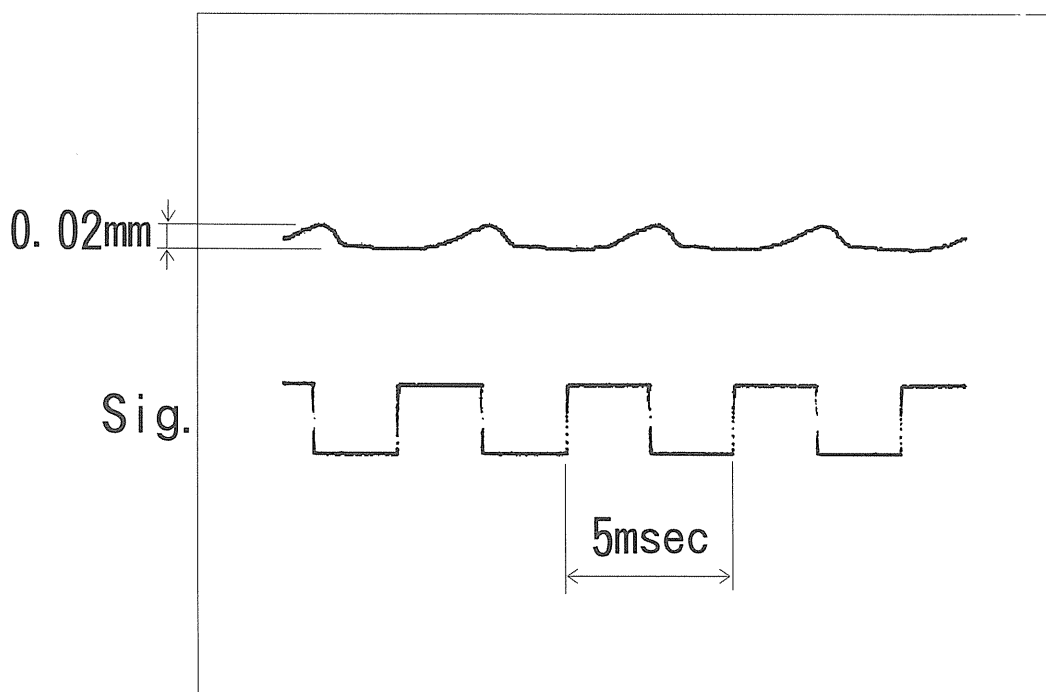


図5-14 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN
従来のドライバー (25V

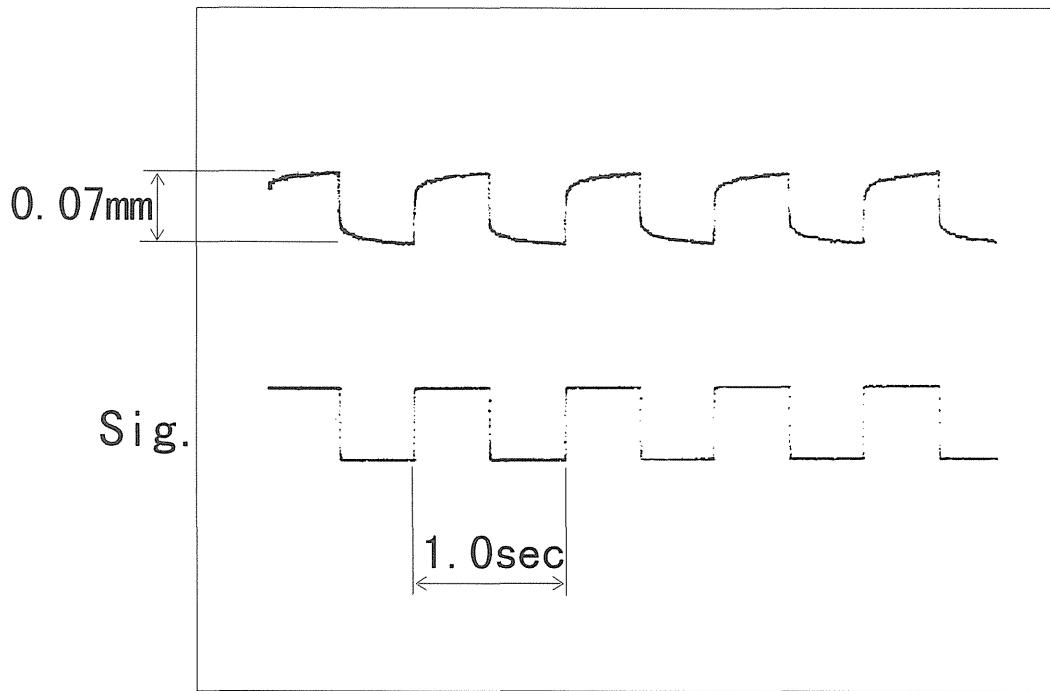


100Hz

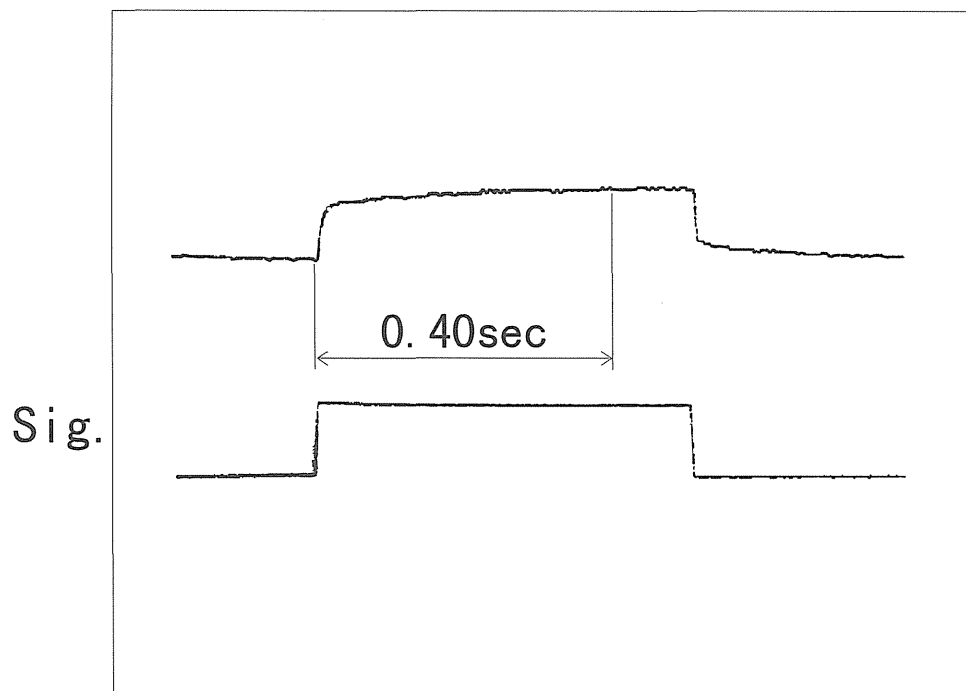


200Hz

図5-15 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (767TURN)
従来のドライバー (10V)

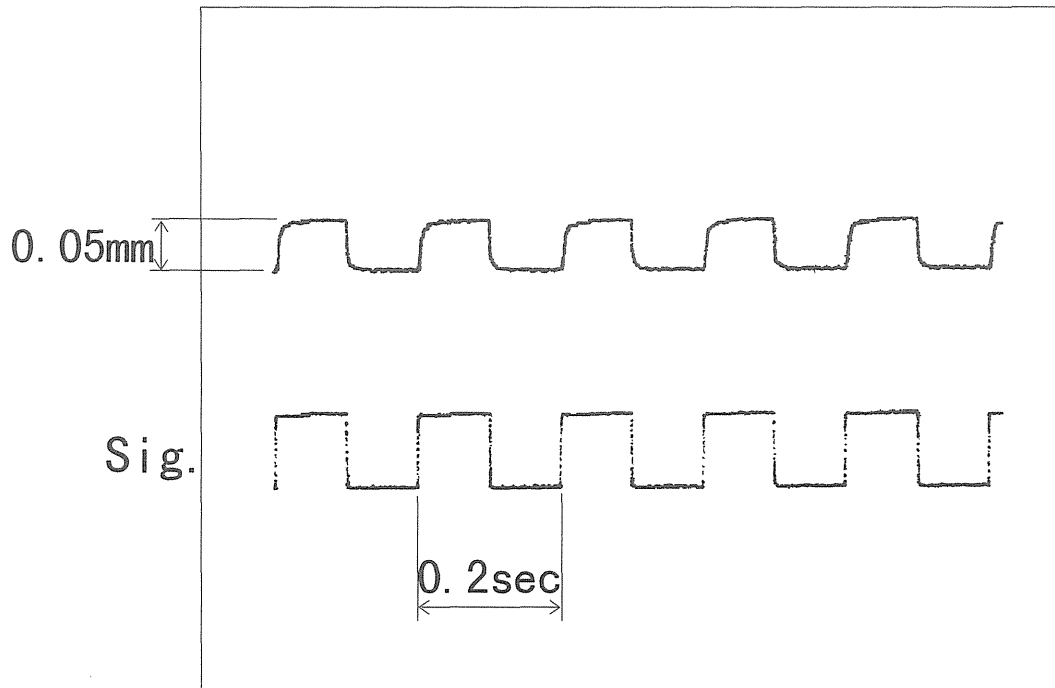


1.00Hz

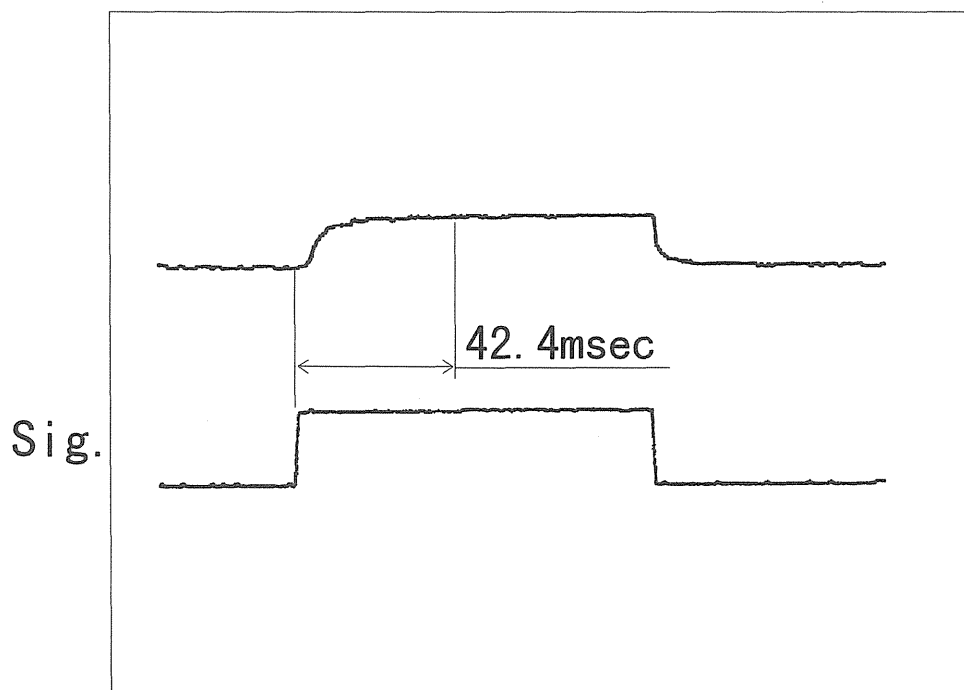


1.00Hz

図5-16 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (767TURN)
従来のドライバー (10V)

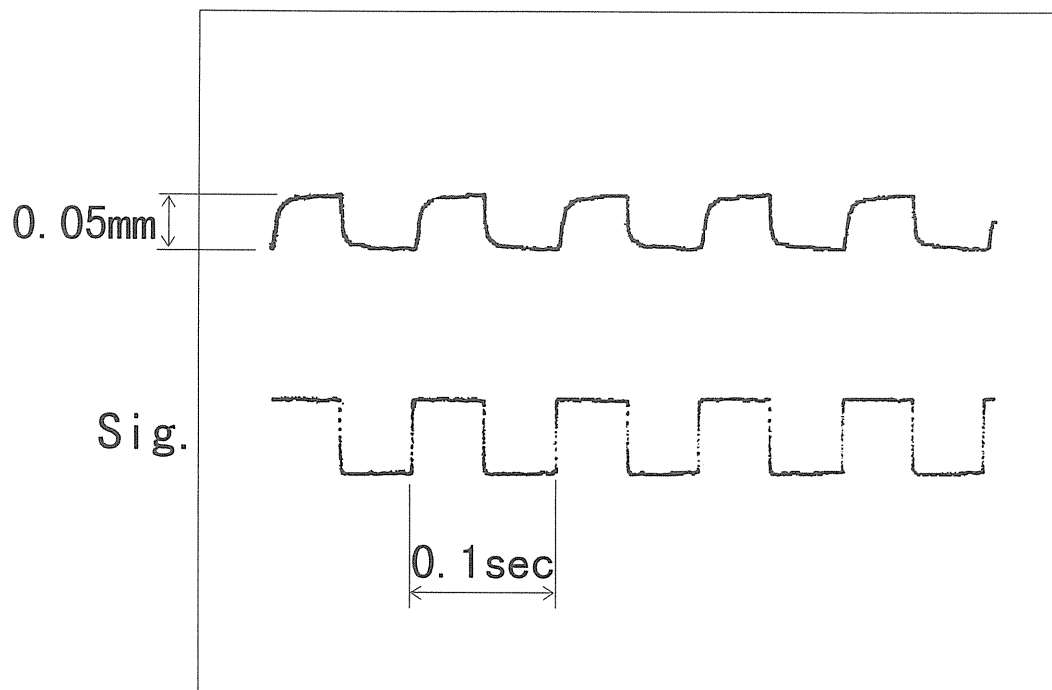


5.00Hz

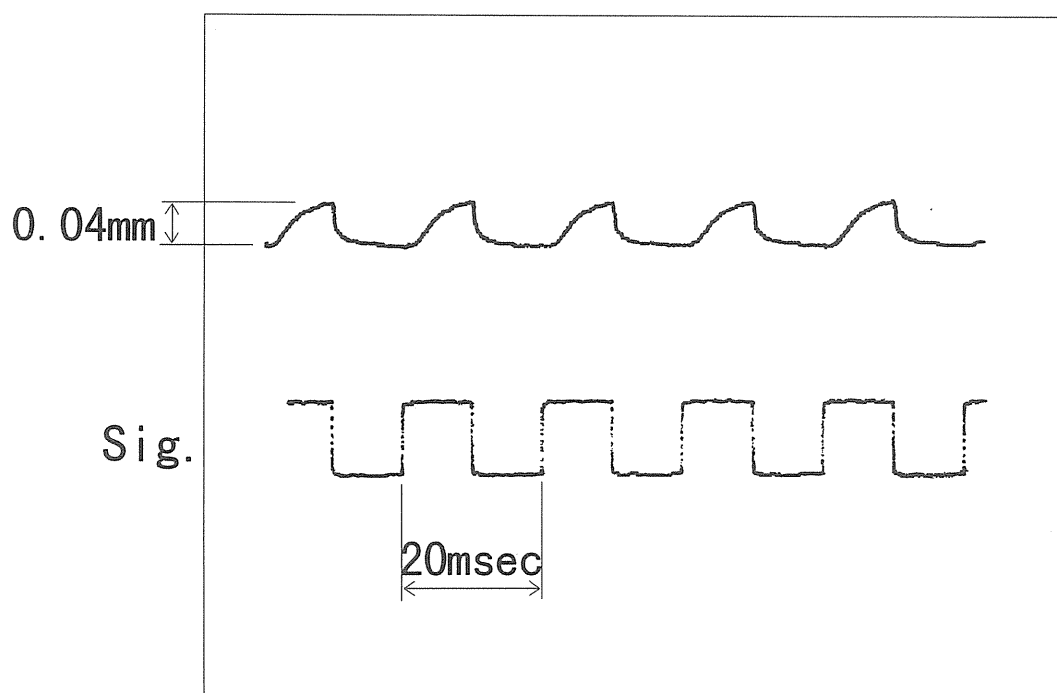


5.00Hz

図5-17 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (767TURN)
従来のドライバー (10V)

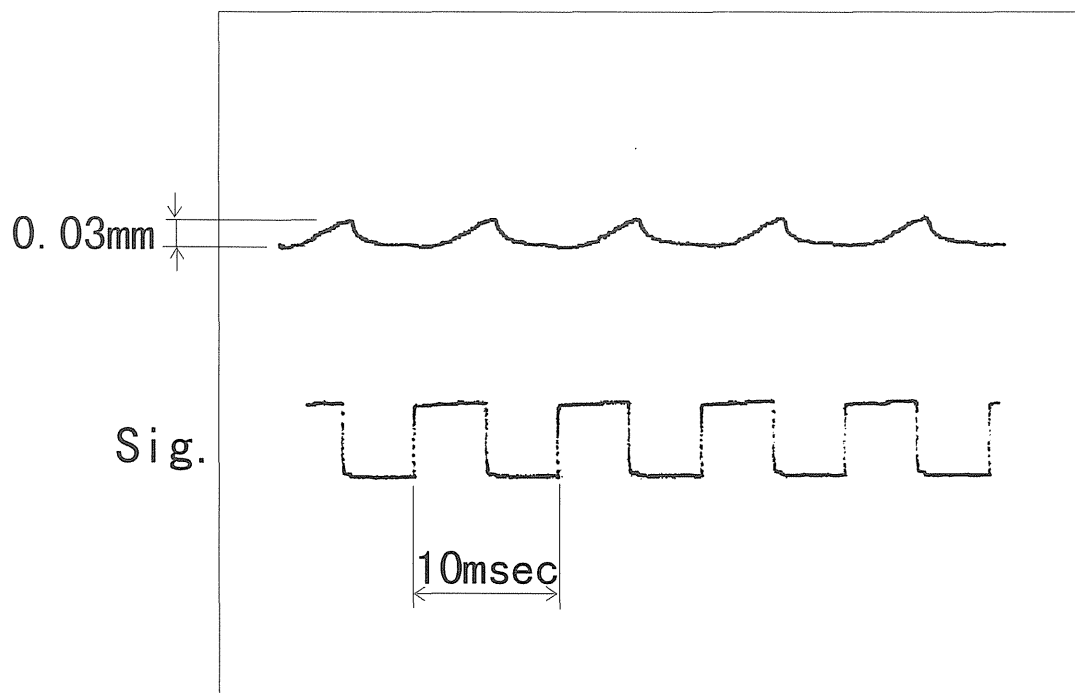


10.0Hz

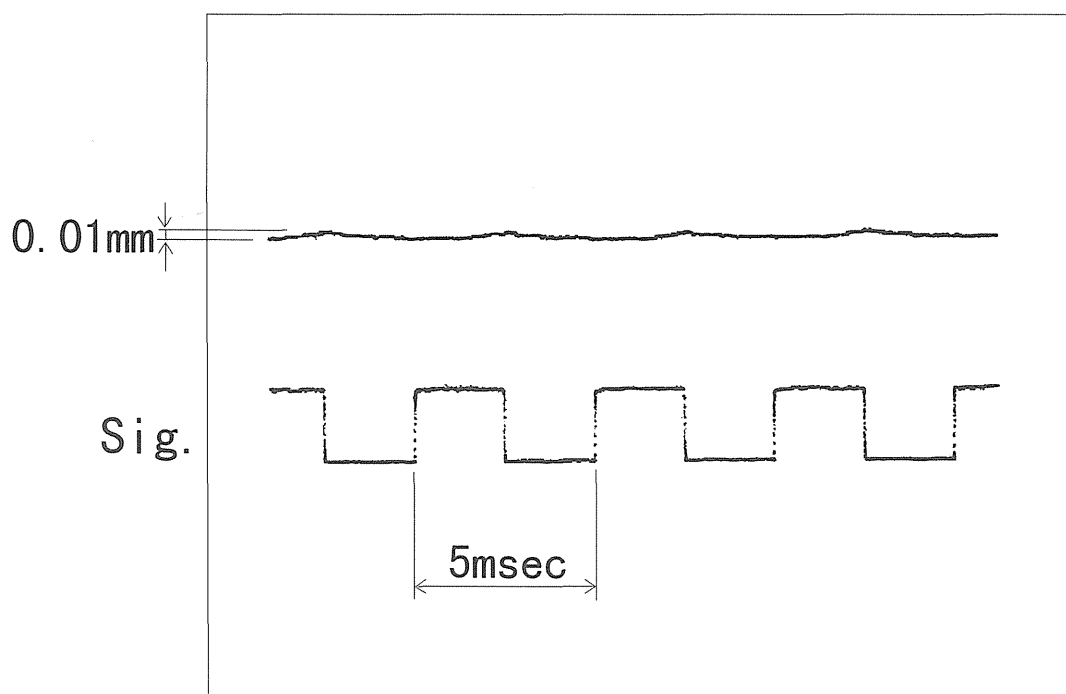


50.0Hz

図5-18 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (767TURN)
従来のドライバー (10V)



100Hz



200Hz

図5-19 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN)
 高速ドライバー
 ($V_1=140V$ 、 $V_2=-140V$ 、 $t_1=0.5ms$ 、 $t_2=0.3ms$)

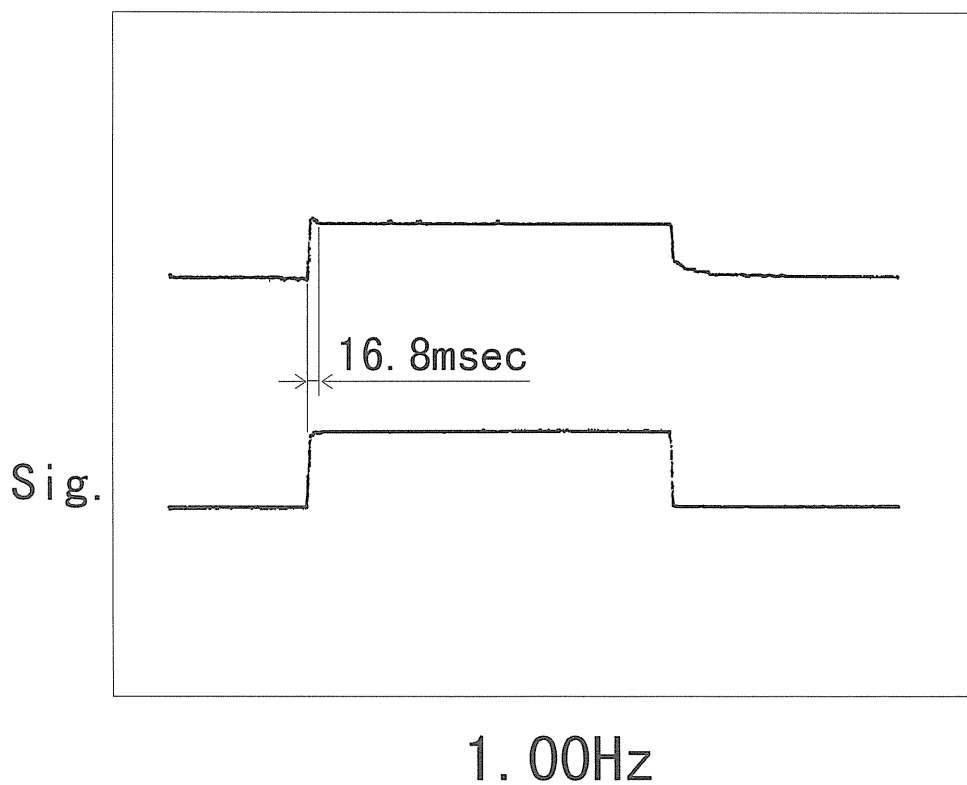
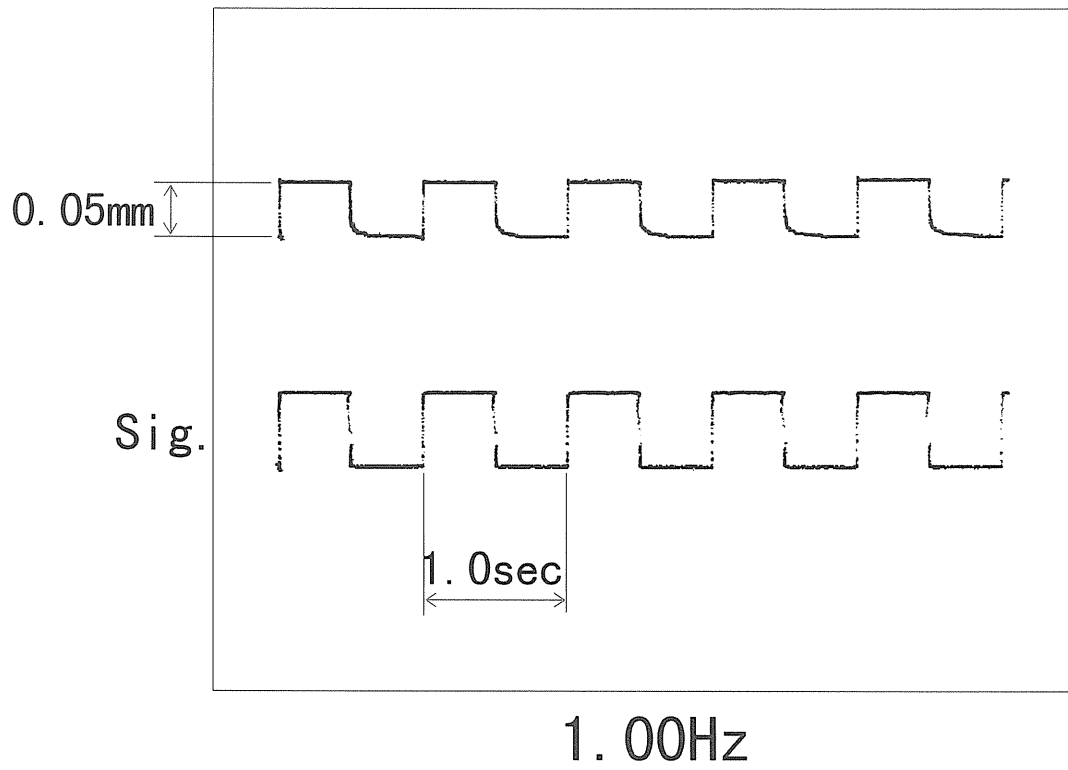
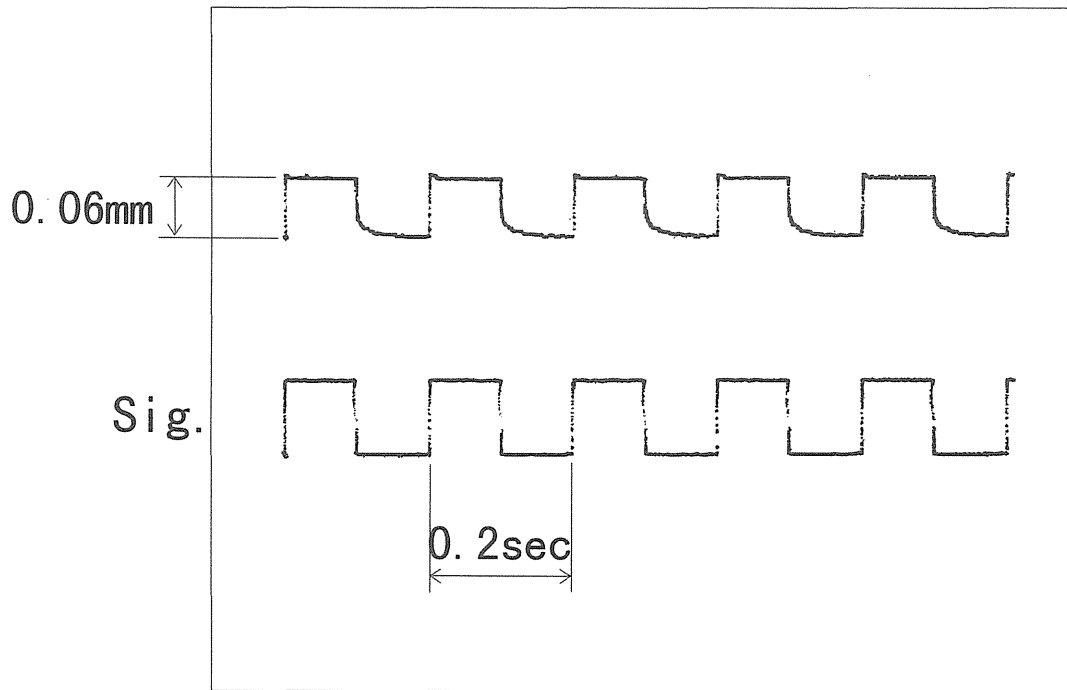
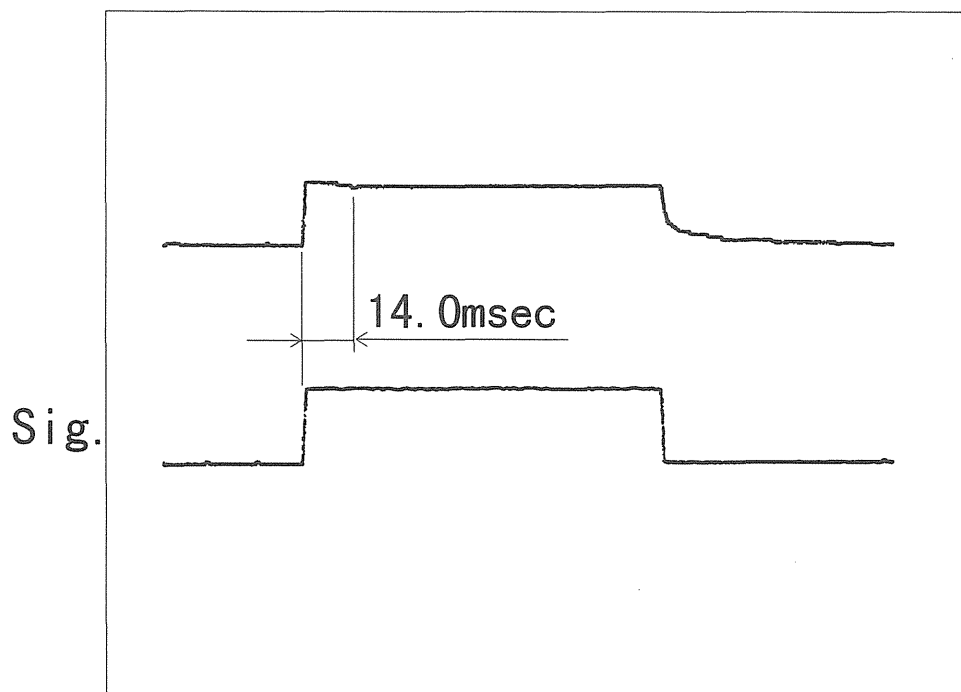


図5-20 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN)
 高速ドライバー
 ($V_1=140V$ 、 $V_2=-140V$ 、 $t_1=0.5ms$ 、 $t_2=0.3ms$)

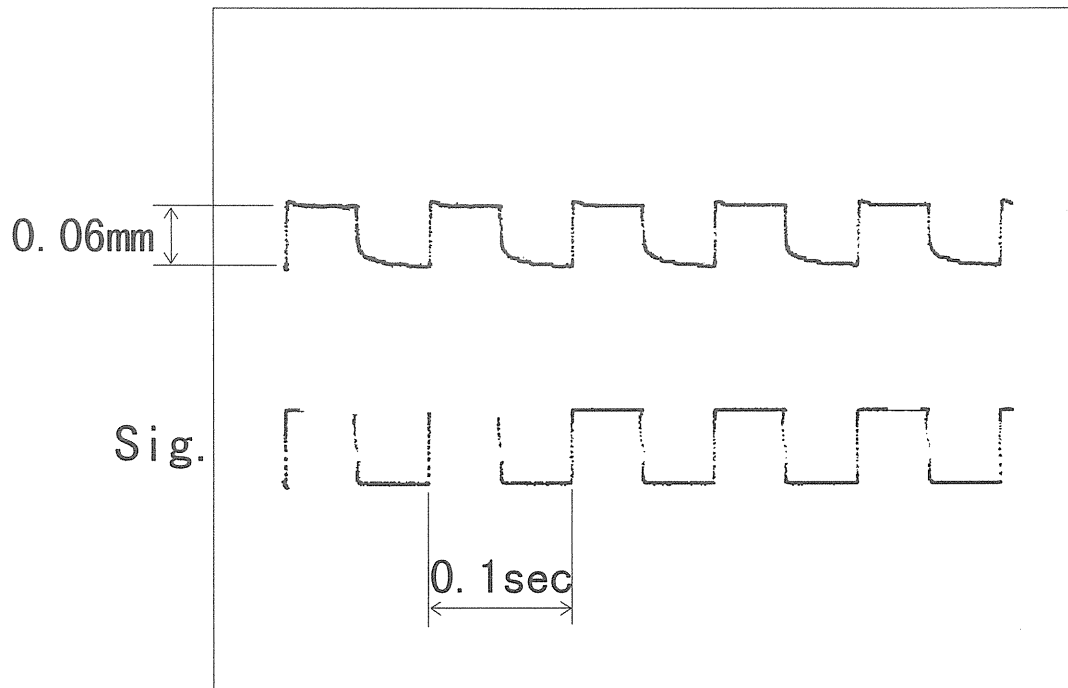


5.00Hz

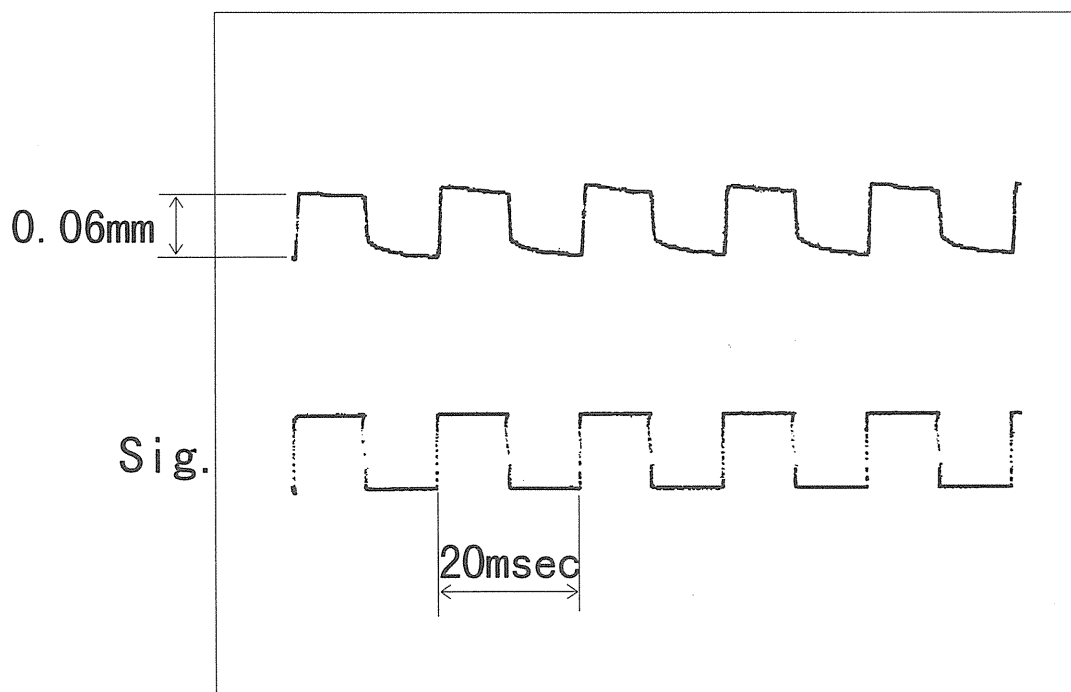


5.00Hz

図5-21 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN)
高速ドライバー
($V_1=140V$ 、 $V_2=-140V$ 、 $t_1=0.5ms$ 、 $t_2=0.3ms$)

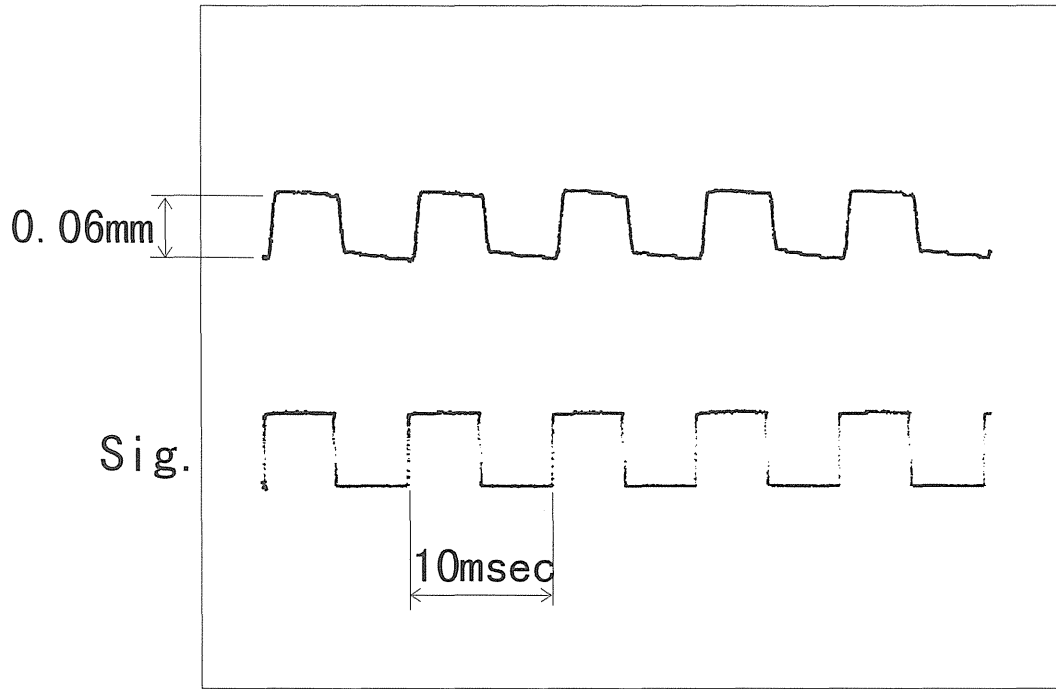


10.0Hz

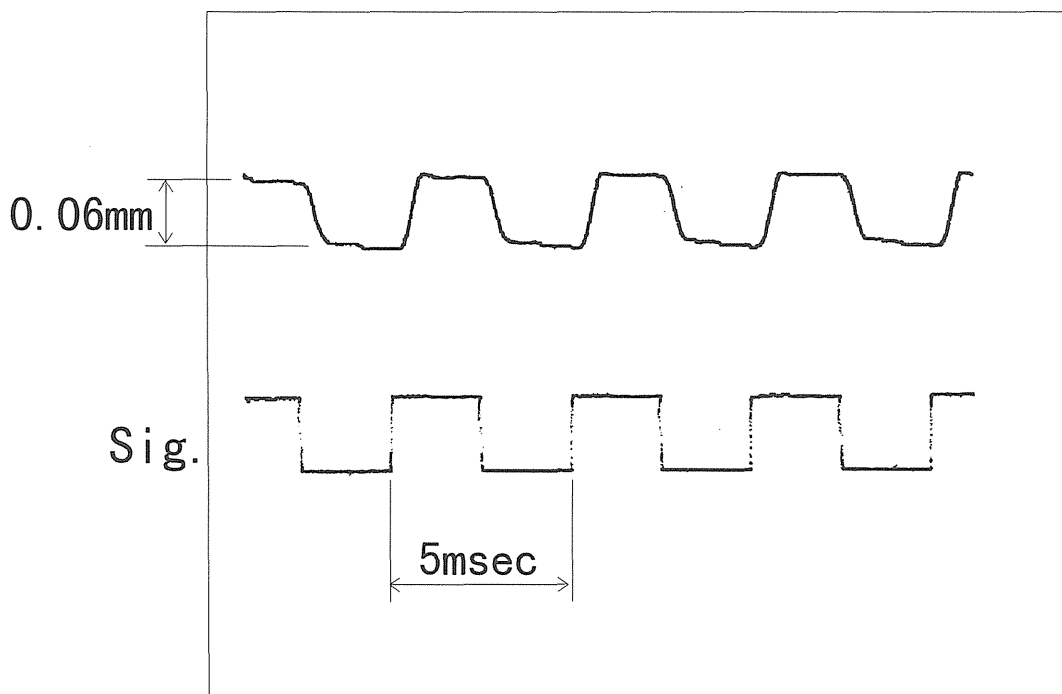


50.0Hz

図5-22 ピストン式超磁歪アクチュエータno.1 (1360TURN)
 高速ドライバー
 ($V_1=140V$ 、 $V_2=-140V$ 、 $t_1=0.5ms$ 、 $t_2=0.3ms$)

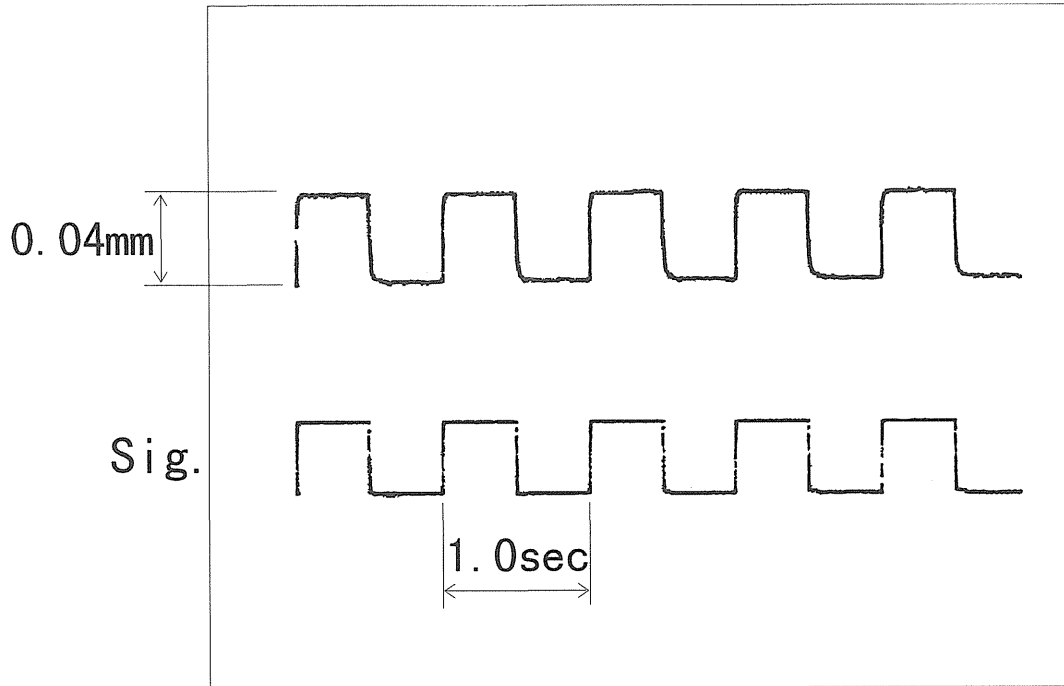


100Hz

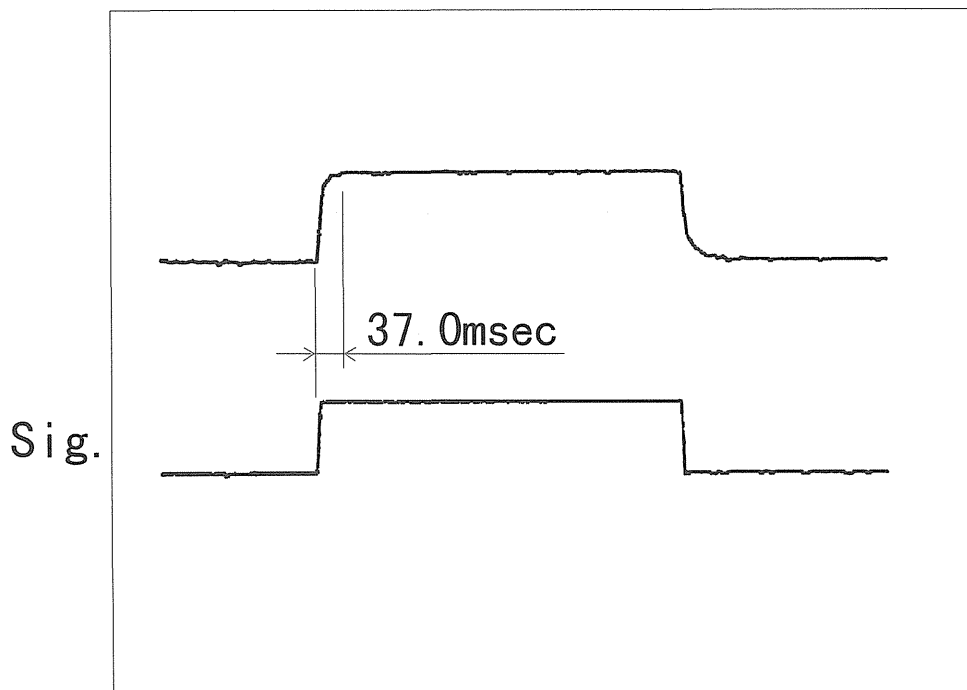


200Hz

図5-23 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2
従来のドライバー (15V)



1.00Hz



1.00Hz

図5-24 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2
従来のドライバー (15V)

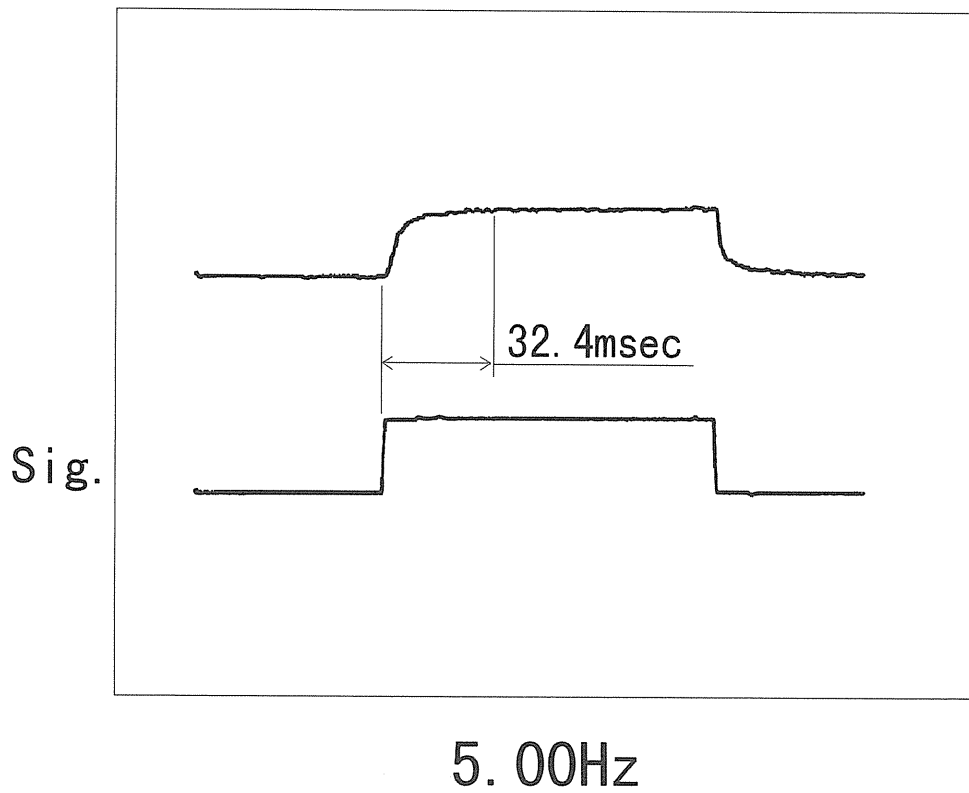
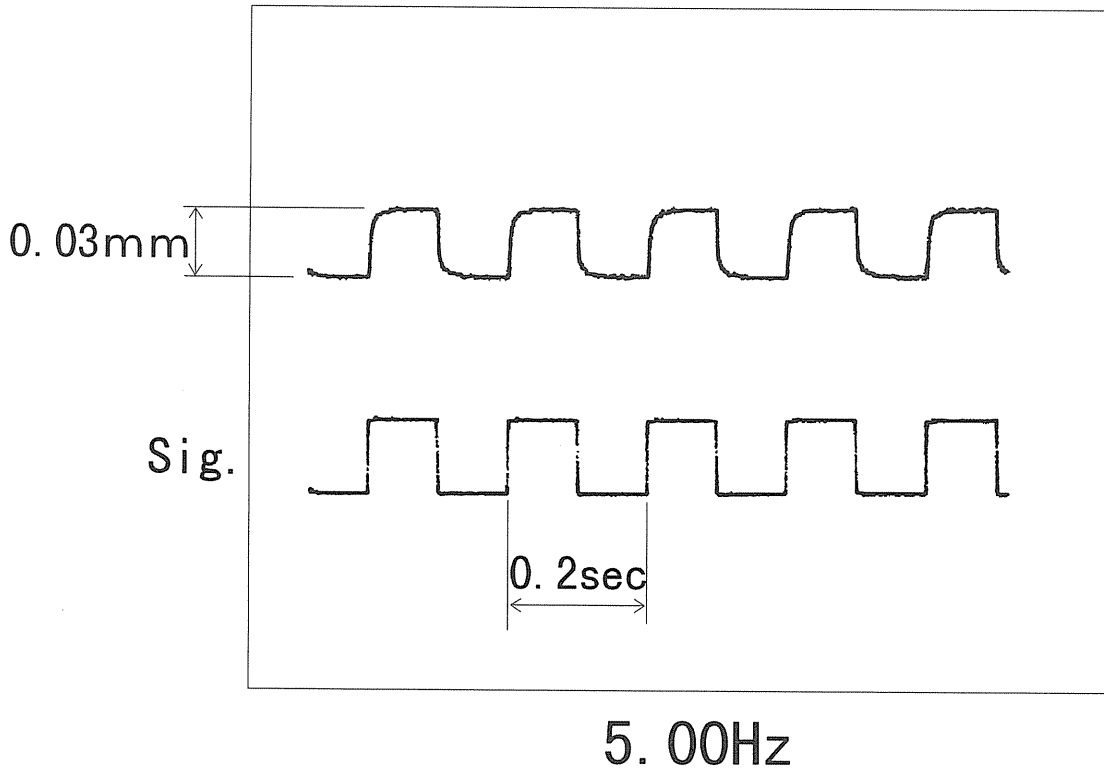
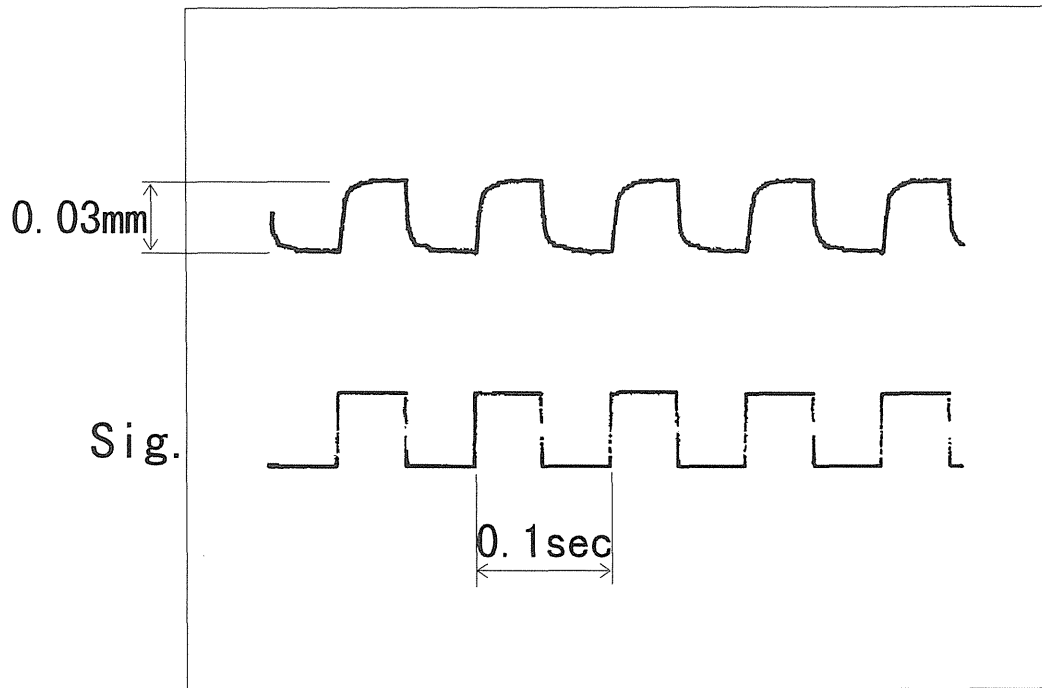
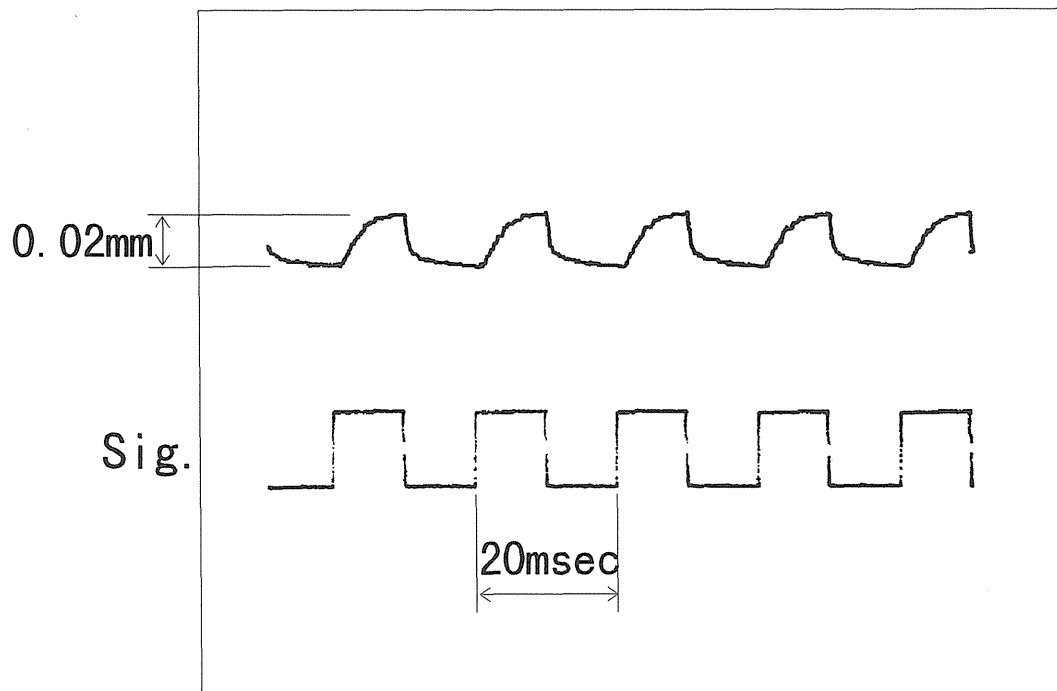


図5-25 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2
従来のドライバー (15V)

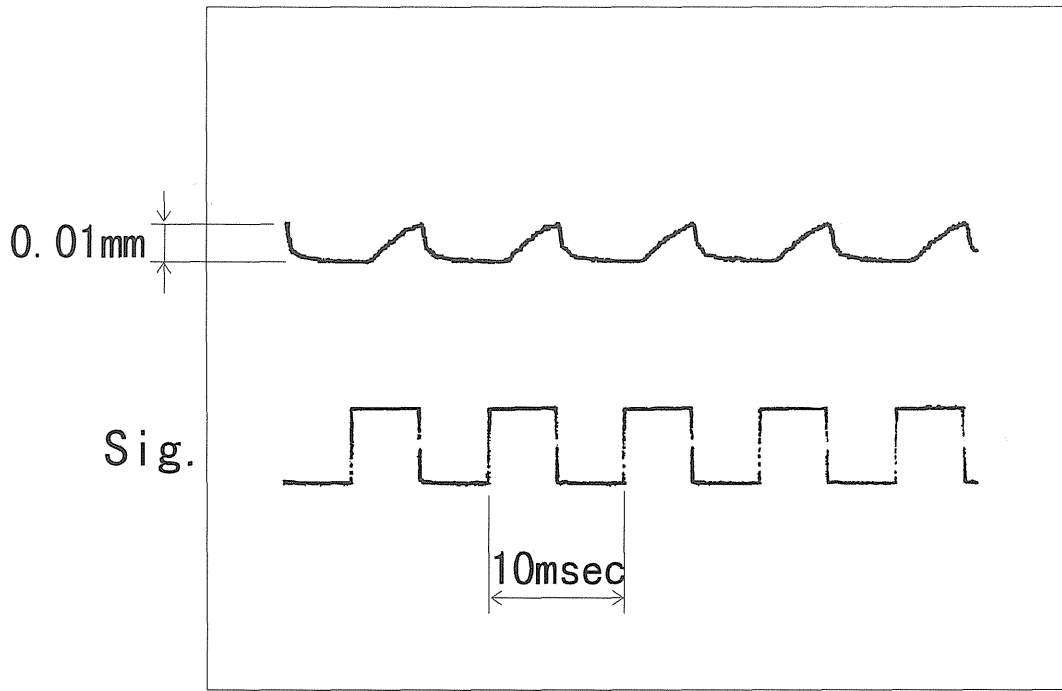


10.0Hz

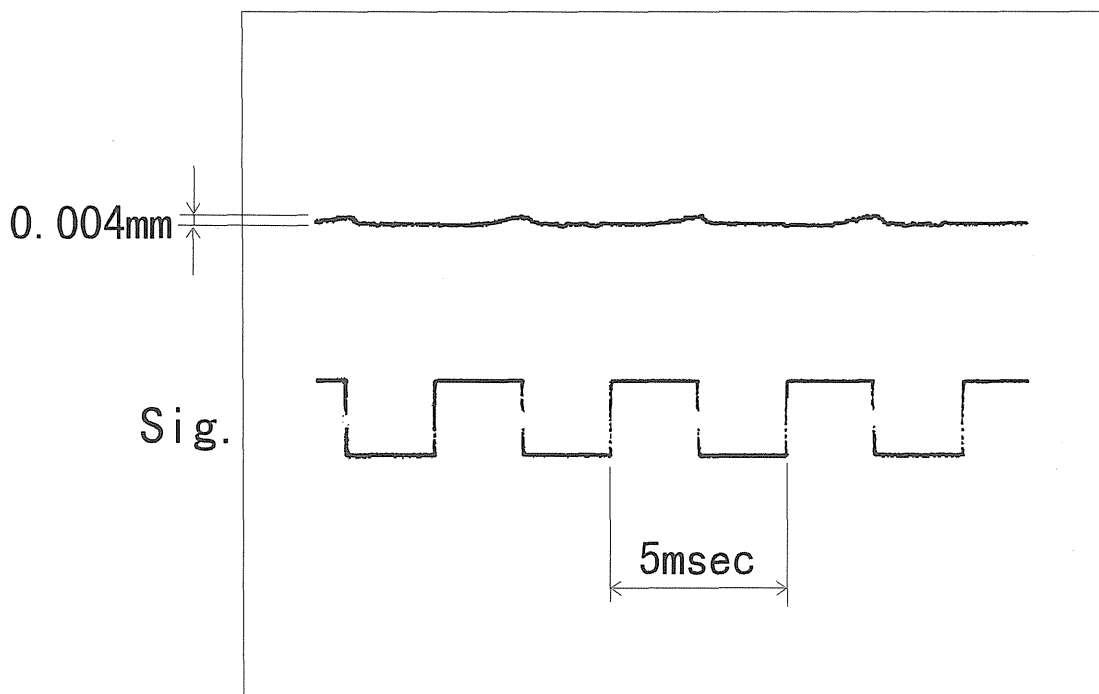


50.0Hz

図5-26 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2
従来のドライバー (15V)



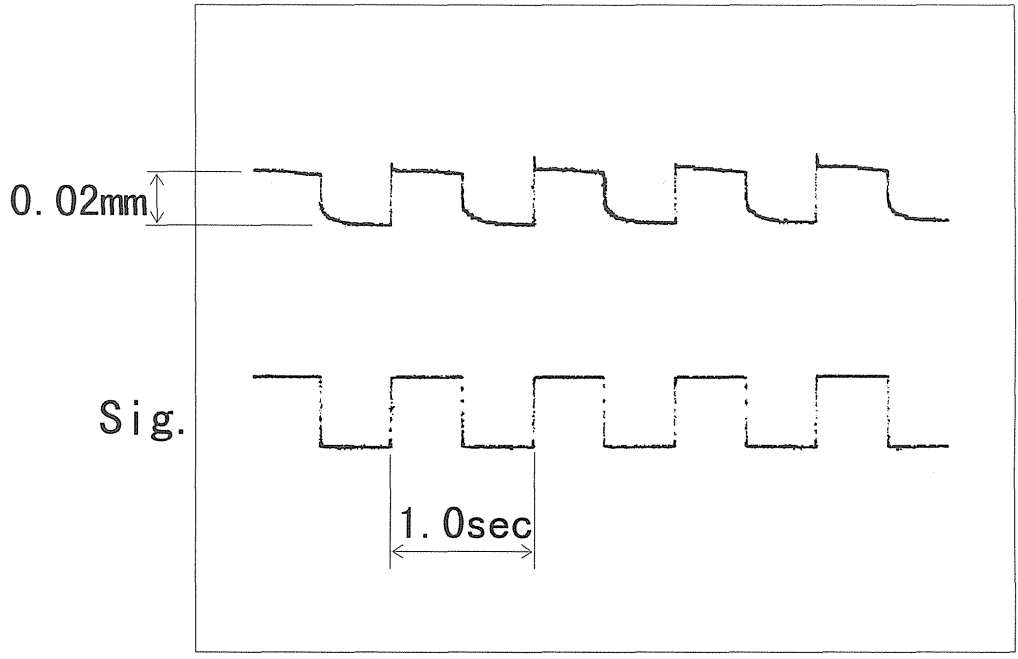
100Hz



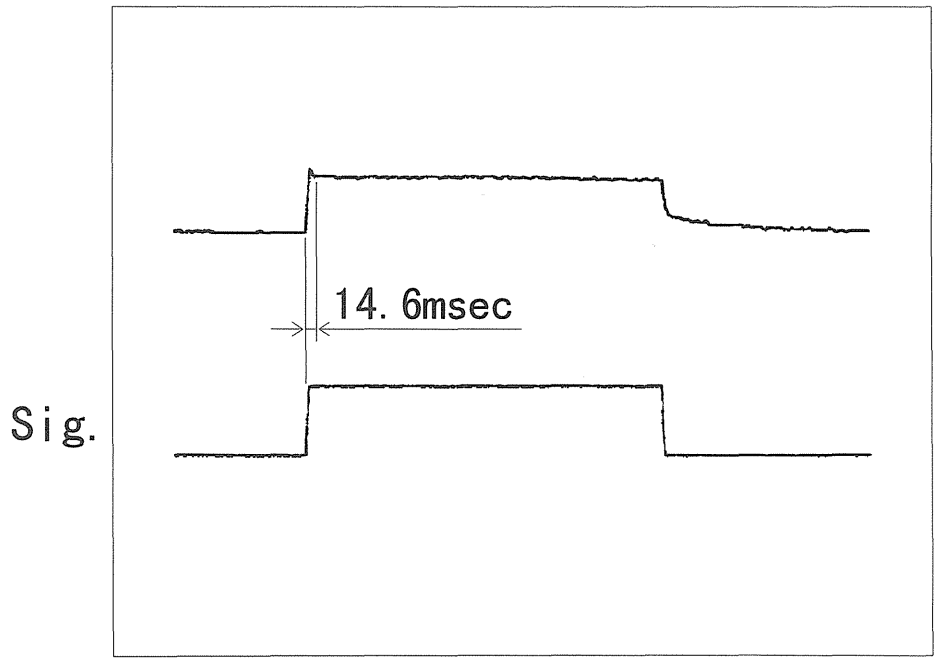
200Hz

図5-27 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2
高速ドライバー
($V_1=150V$ 、 $V_2=-150V$)

($t_1=0.5ms$ 、 $t_2=0.3ms$)



1.00Hz



1.00Hz

図5-28 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2
高速ドライバー
($V_1=150V$ 、 $V_2=-150V$)

($t_1=0.3ms$ 、 $t_2=0.3ms$)

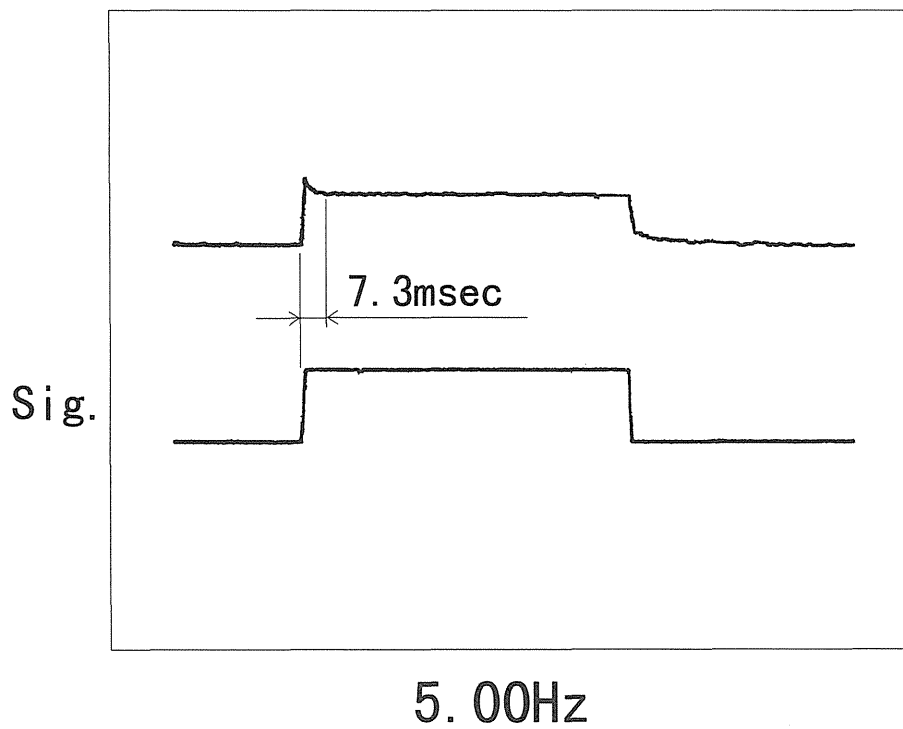
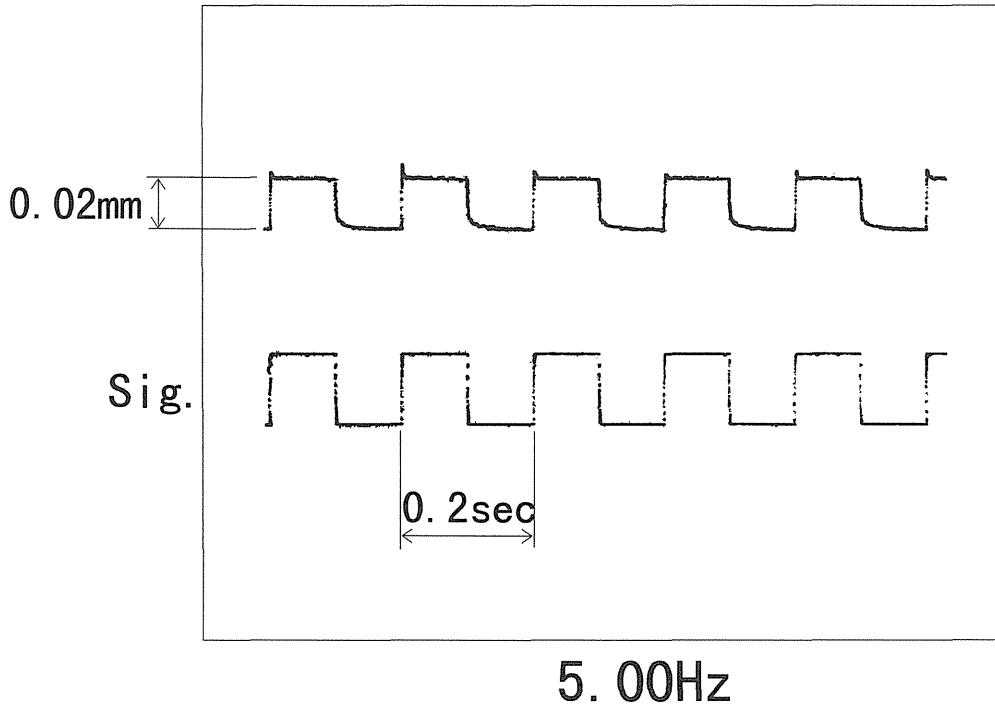
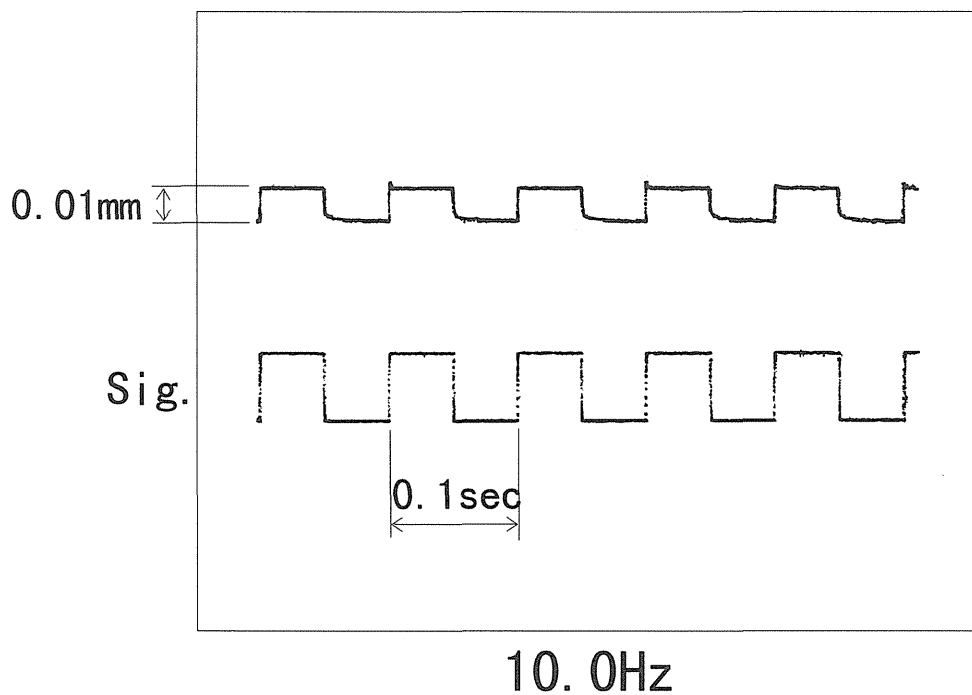


図5-29 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2
高速ドライバー
($V_1=150V$ 、 $V_2=-150V$)

($t_1=0.25ms$ 、 $t_2=0.3ms$)



($t_1=0.2ms$ 、 $t_2=0.3ms$)

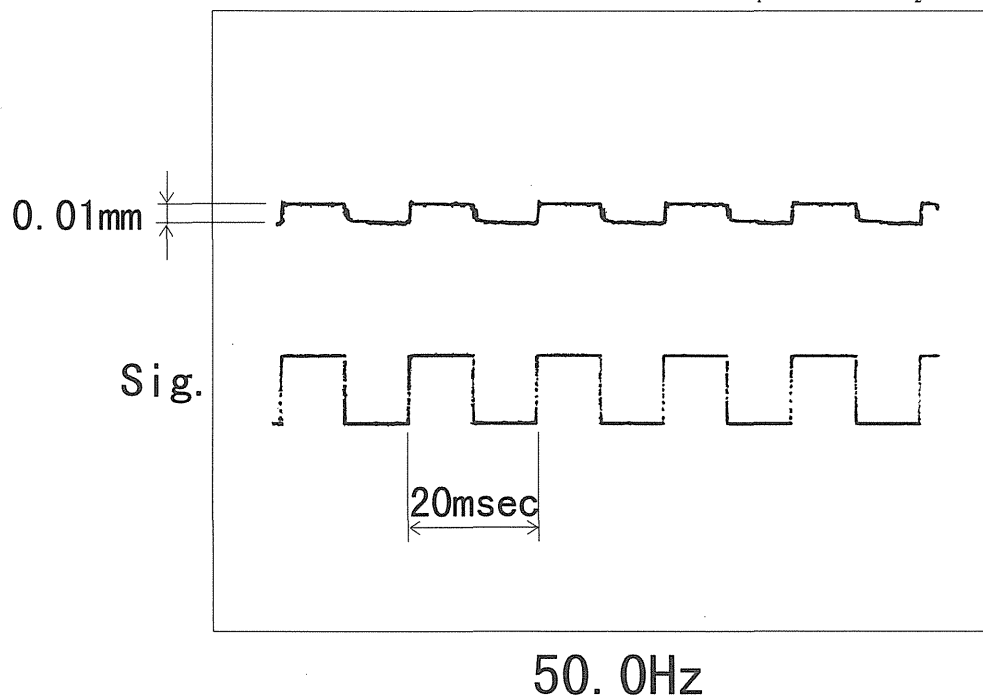
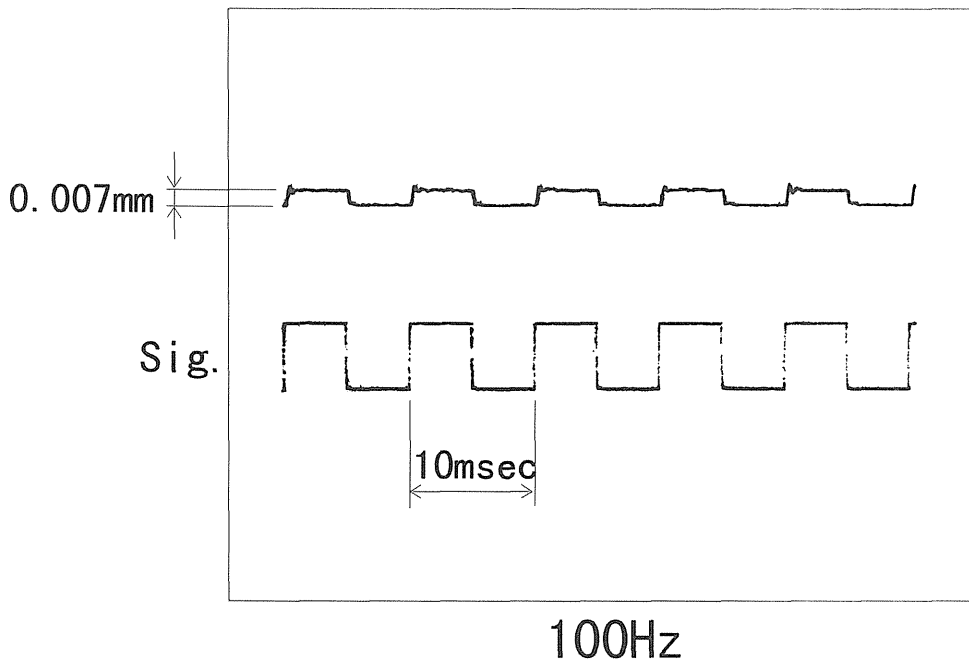
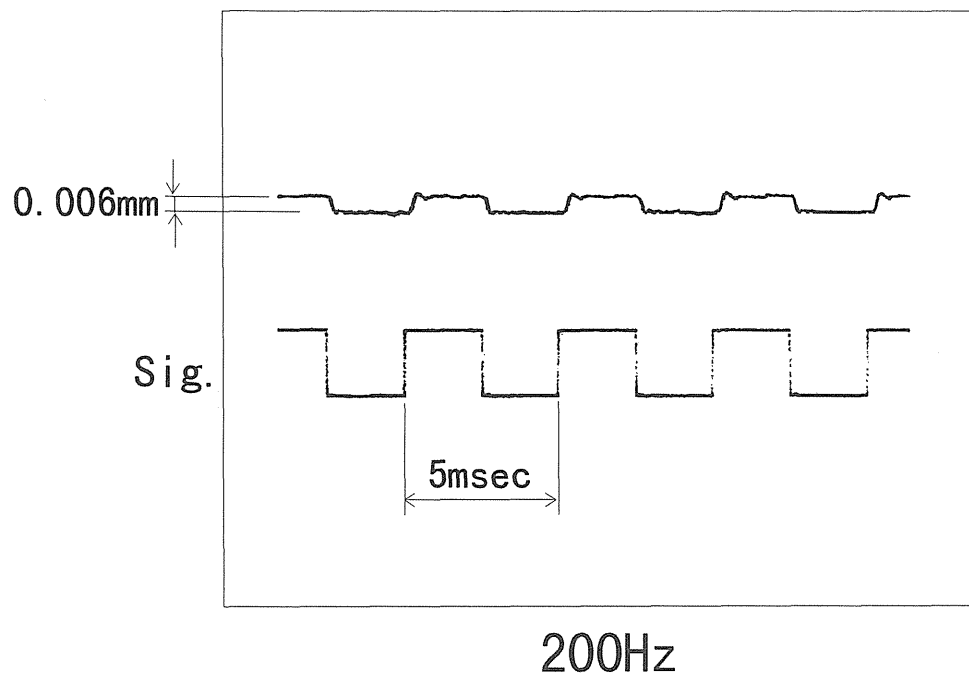


図5-30 ピストン式超磁歪アクチュエータno.2
高速ドライバー
($V_1=150V$ 、 $V_2=-150V$)

($t_1=0.2ms$ 、 $t_2=0.2ms$)



($t_1=0.2ms$ 、 $t_2=0.2ms$)



5-3-4 考察

ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1、ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2 ともに変位量は小さく、変位増幅が思うようになされていない。これは内部流体のピストン摺動部からのリーク、内部流体の圧縮、チェック弁を介しての油の補給時における気泡の含有およびチェック弁自体からの油の逆流が主な原因である。

ピストン式超磁歪アクチュエータ no.1 においては、コイル巻き数 767TURN の時よりも 1360TURN の方が変位量は大きく、コイル巻き数の多い 1360TURN の方が超磁歪素子に対し磁氣的に適していることがわかった。また 767TURN の方が応答が遅いのは、内部流体圧力と押さえばね力のバランスが微妙にずれてしまったためと思われる。

ピストン式超磁歪アクチュエータ no.2 においては、ばね予圧式超磁歪素子に既にプレストレスがかけられていて出力も 220N であることを考え、油圧を 0.22MPa と低く設定したため、気泡を含んだ内部流体の圧縮が大きく変位の増幅は得られなかった。

また従来のドライバーを用いた場合は高周波で駆動するほど変位量の低下が見られたのに対し、高速ドライバーを用いた場合は応答の遅れが改善され、周波数によらずほぼ一定の変位量が得られた。

第6章 ベローズ式超磁歪アクチュエータの 特性評価

6-1 磁場（電流）－変位特性の静特性の測定

6-1-1 測定装置

図6-1に、ベローズ式超磁歪アクチュエータの磁場（電流）－変位特性の静特性の測定に用いた装置の略図を示す。アクチュエータはベローズ式超磁歪アクチュエータ no.1（1360TURN）とベローズ式超磁歪アクチュエータ no.2である。なおベローズ式流体増幅機構には、予め真空ポンプで空気抜きをした作動油を大気圧のもとで封入してある。

6-1-2 測定方法

アクチュエータの駆動電流を変化させたときの変位特性の静特性を以下の手順で行う。

- ① 図6-1のように設置する。
- ② アクチュエータの駆動電流を0Aから上げていき、一定電流に達した後再び0Aまで下げていく。この時X軸に電流値、Y軸に変位が測れるようにX-Yプロッタに接続する。

6-1-3 測定結果

実験の測定結果を図6-2、6-3に示す。

6-1-4 考察

実験結果の図はどれも超磁歪素子の磁歪曲線と似た形をしている。従って超磁歪素子の磁歪変位が小ベローズに確実に伝えられていることがわかる。またピストン式超磁歪アクチュエータの磁場（電流）－変位特性よりもヒステリシスが小さくなっている。これはピストンの時と違い、小ベローズが変位するときには摩擦が生じないからである。

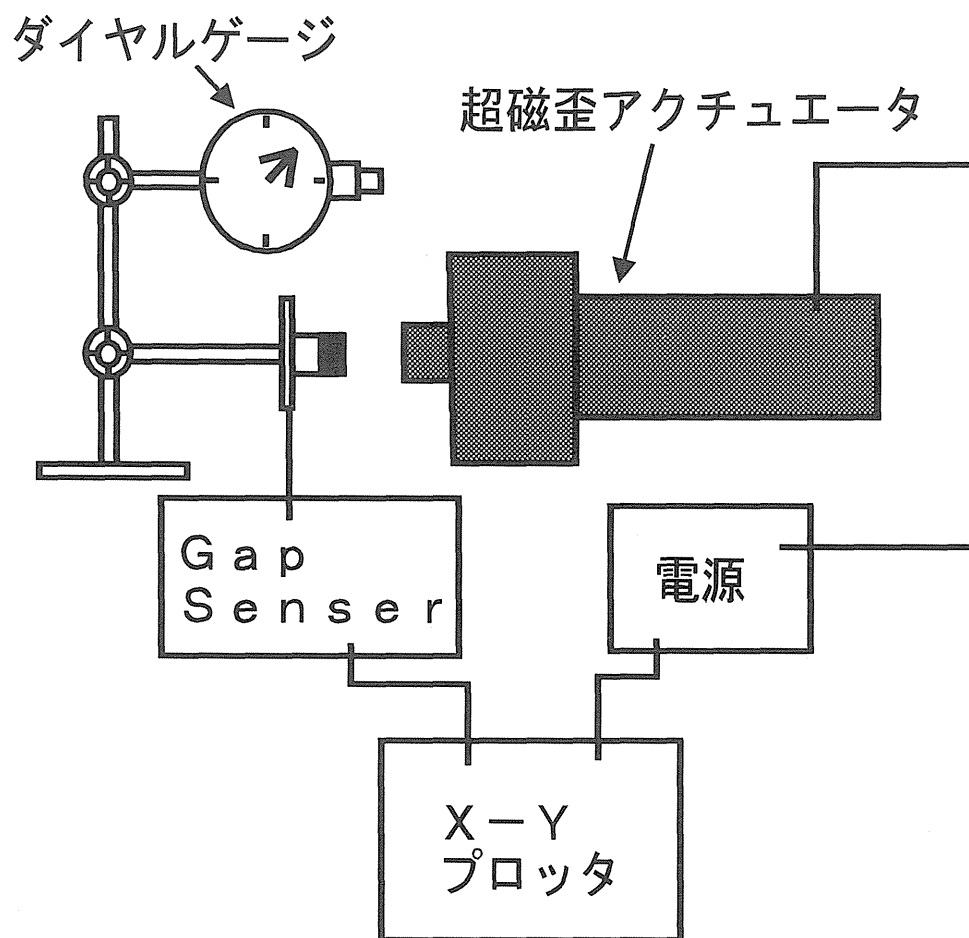


図6-1 ベローズ式超磁歪アクチュエータ
磁場（電流）-変位特性の静特性の測定

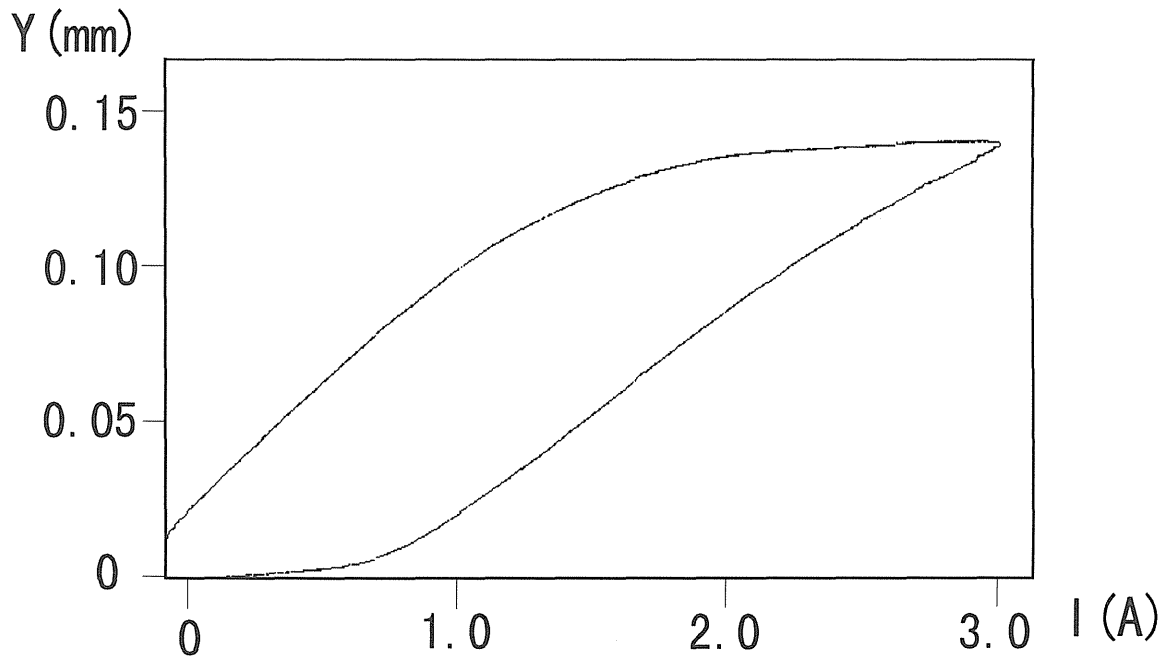


図 6 - 2 ベローズ式超磁歪アクチュエータbo.1

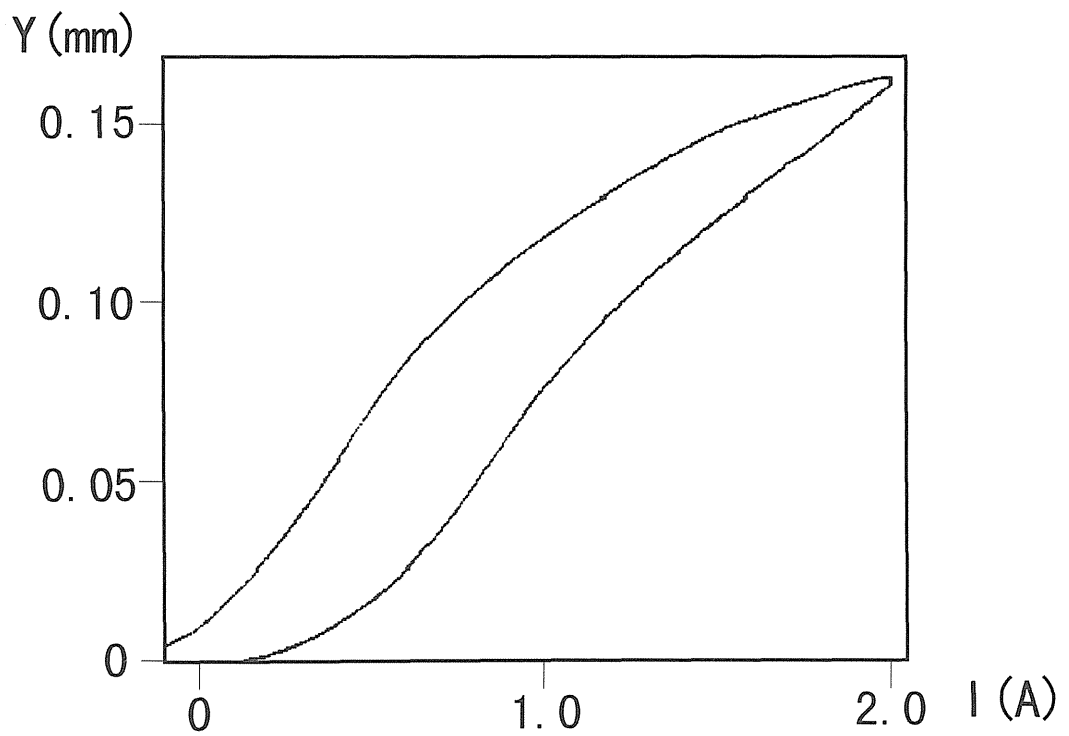


図 6 - 3 ベローズ式超磁歪アクチュエータbo.2

6-2 磁場（電流）－変位出力特性の静特性の測定

6-2-1 測定装置

図6-5に、ベローズ式超磁歪アクチュエータの磁場（電流）－変位出力特性の静特性の測定に用いた装置の略図を示す。測定はピストン式超磁歪アクチュエータの時と同様にギャップセンサとロードセルを用いて行うが、小ベローズ端面に直接ロードボタンを当てるとベローズが傾いてしまうので、小ベローズの先にガイドと小ピストンを設けた（図6-4参照）。

6-2-2 測定方法

アクチュエータの駆動電流を一定にしたときの磁場（電流）－変位出力特性の静特性の測定を以下の手順で行う。

(I)

- ① 図6-5のように設置する。
- ② ハンドルを回して台座を動かしたときロードセルとアクチュエータの小ピストンが当たるように設置し、再びロードボタンから小ピストンを離す。
- ③ ハンドルを回してロードボタンで小ピストンを押していき、小ベローズが完全に潰れる位置（急激に力が増加する位置）にきたら、ロードボタンを引いて小ピストンから離す。この時X軸に力、Y軸に変位が測れるようにX-Yプロッタに接続する。
- ④ 定電流源を用いて、アクチュエータを一定電流で駆動する。
- ⑤ ③の操作を行う。
- ⑥ 駆動電流を変えて同手順で行う。

(II)

- ① 図6-5のように設置する。
- ② ハンドルを回して台座を動かしたときロードセルとアクチュエータの小ピストンが当たるように設置する。
- ③ ロードセルのロードボタンにアクチュエータの小ピストンの先端を接触させ、そこを基準点とする。
- ④ 定電流源を用いて、アクチュエータを一定電流で駆動する。
- ⑤ ハンドルを回してロードボタンをピストンに接触させてX-Yプロッタの目盛りが基準線まできたら、ロードボタンを小ピストンから離す。この時X軸に力、Y軸に変位が測れるようにX-Yプロッタに接続する。
- ⑥ 駆動電流を変えて同手順で行う。

(Ⅲ)

- ① 図6-5のように設置する。
- ② ロードボタンで小ストンを押していき、5.5mmの位置で止めておく。
- ③ ハンドルを回してロードボタンで小ピストンをさらに押していき、0.5mmほど押したら再び5.5mmの位置に戻していく。この時X軸に力、Y軸に変位が測れるようにX-Yプロッタに接続する。
- ④ 定電流源を用いて、アクチュエータを一定電流で駆動する。
- ⑤ ③の操作を行う。
- ⑥ 駆動電流を変えて同手順で行う。

6-2-3 測定結果

実験の測定結果を図6-6～図6-11に示す。

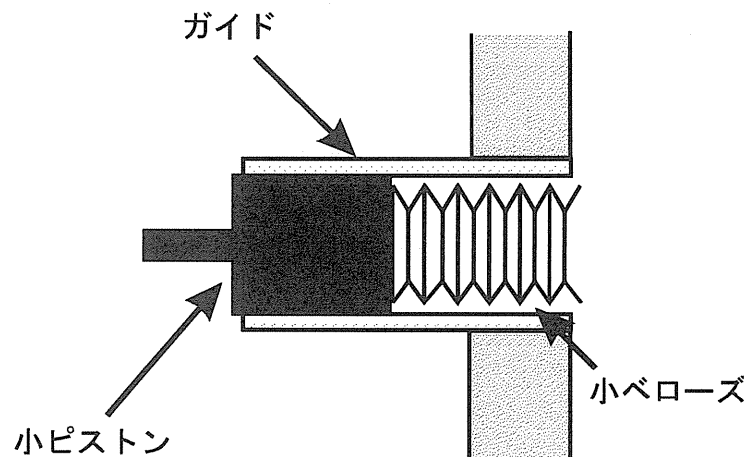


図6-4 小ピストンとガイド

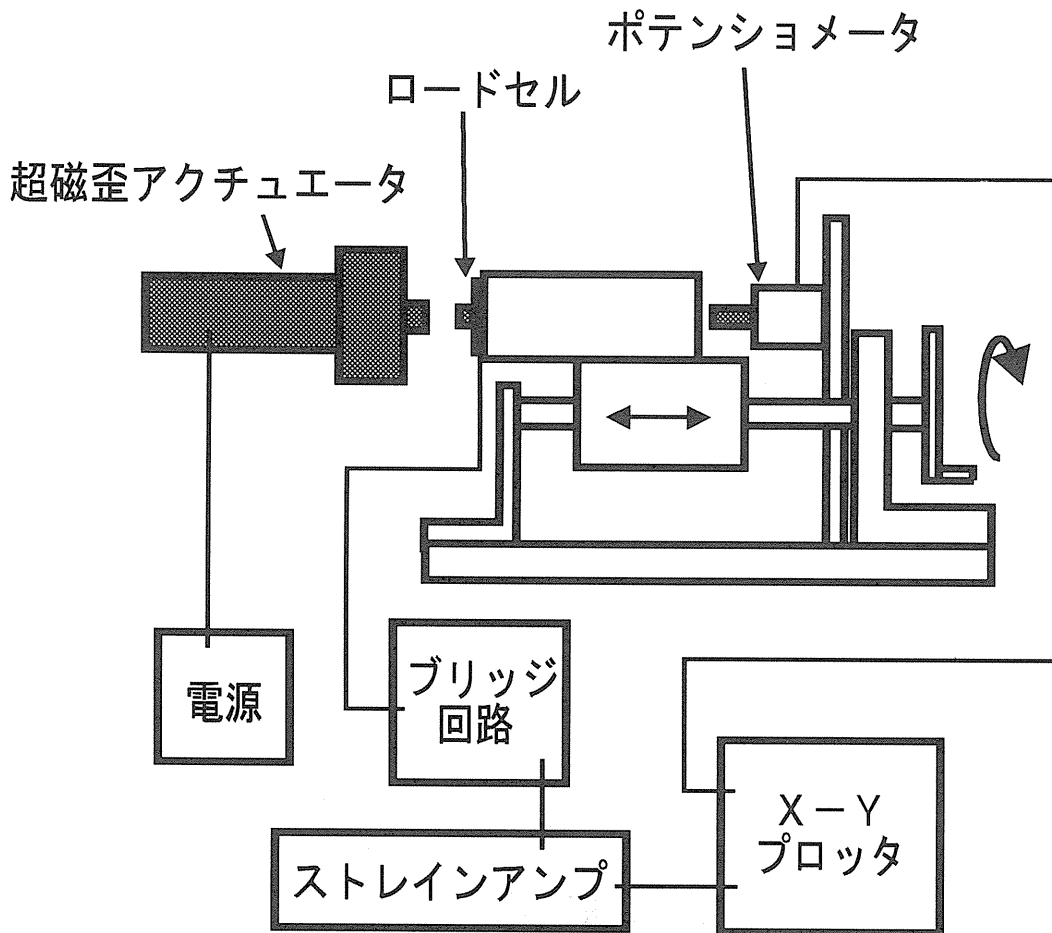


図 6 - 5 ベローズ式超磁歪アクチュエータ
磁場（電流）-変位出力特性の静特性の測定

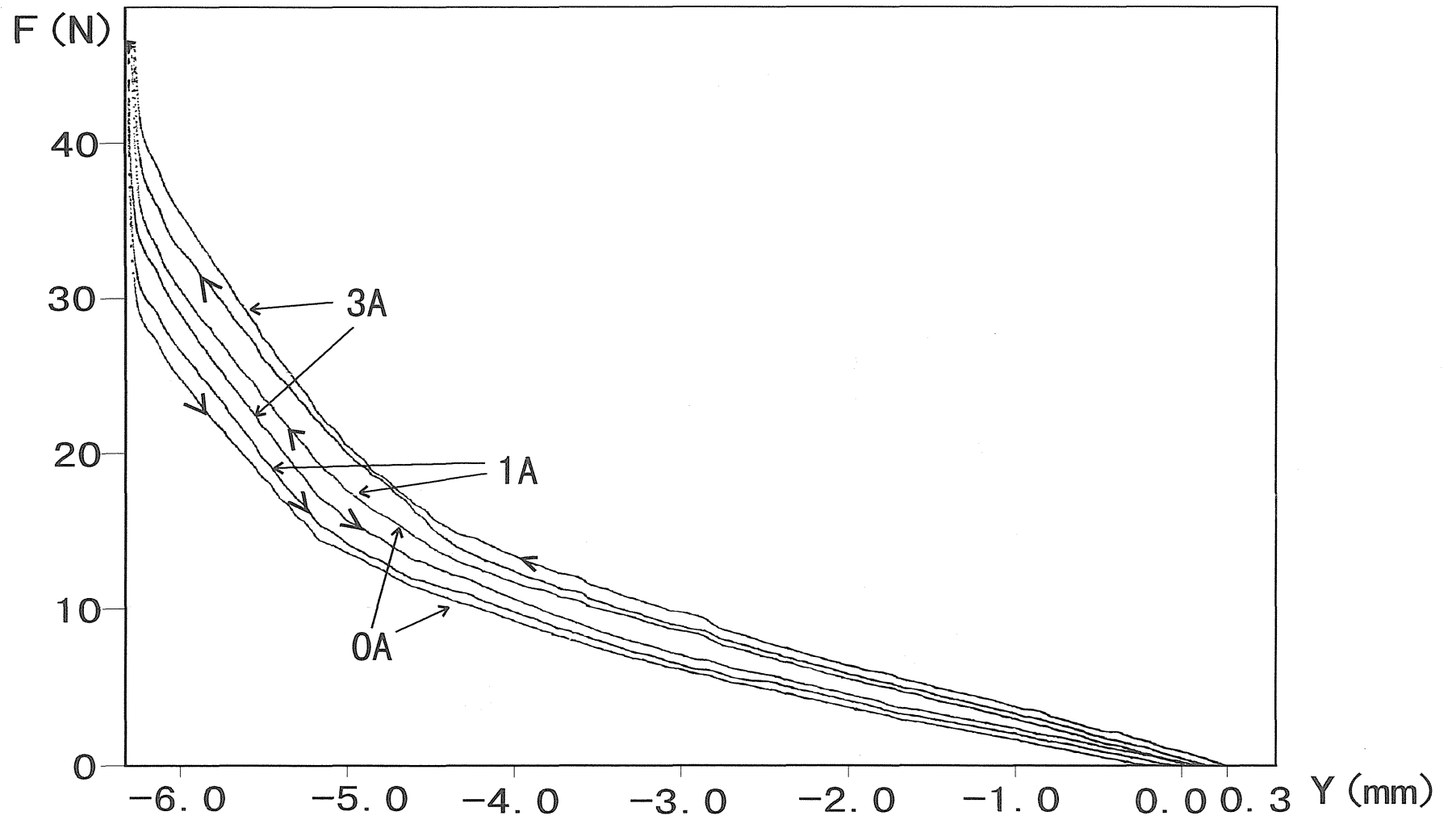


図6-6 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.1 (実験I)

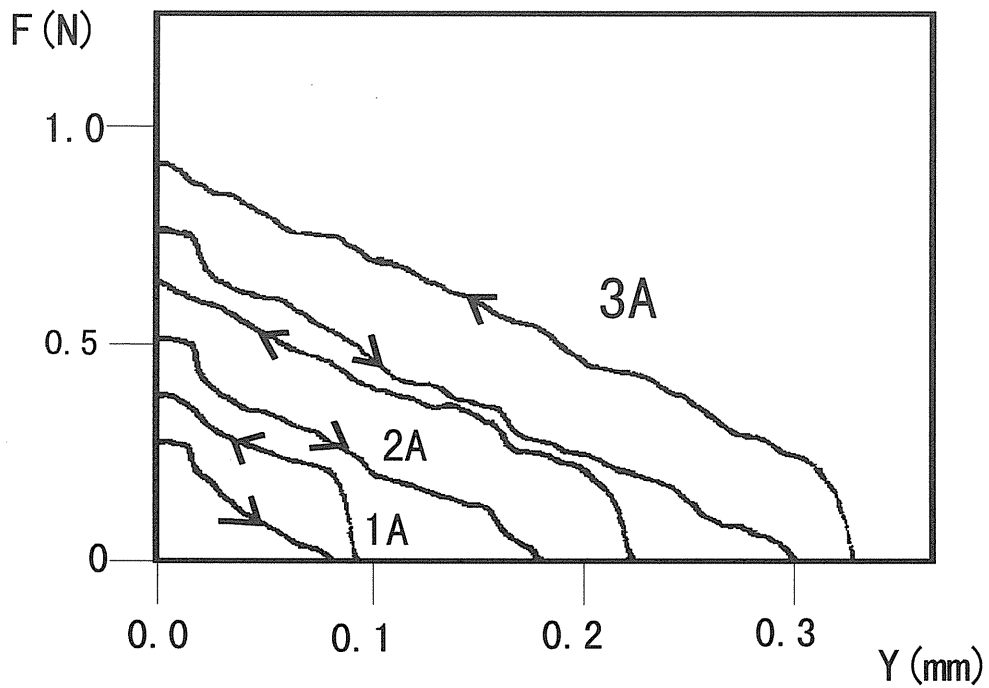


図6-7 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.1 (実験II)

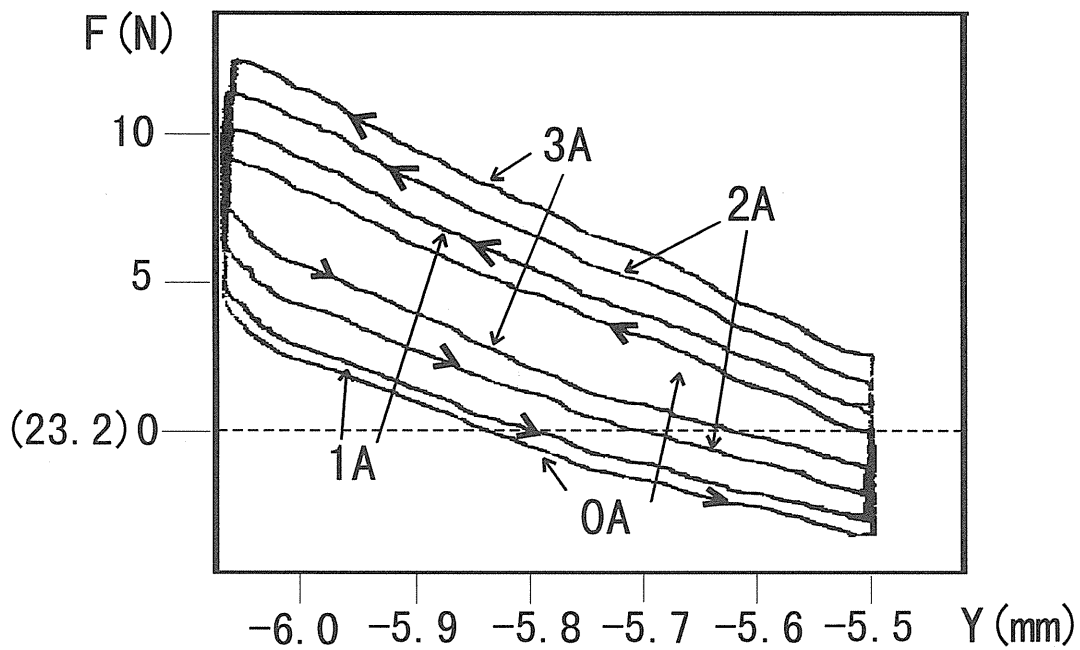


図6-8 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.1 (実験III)

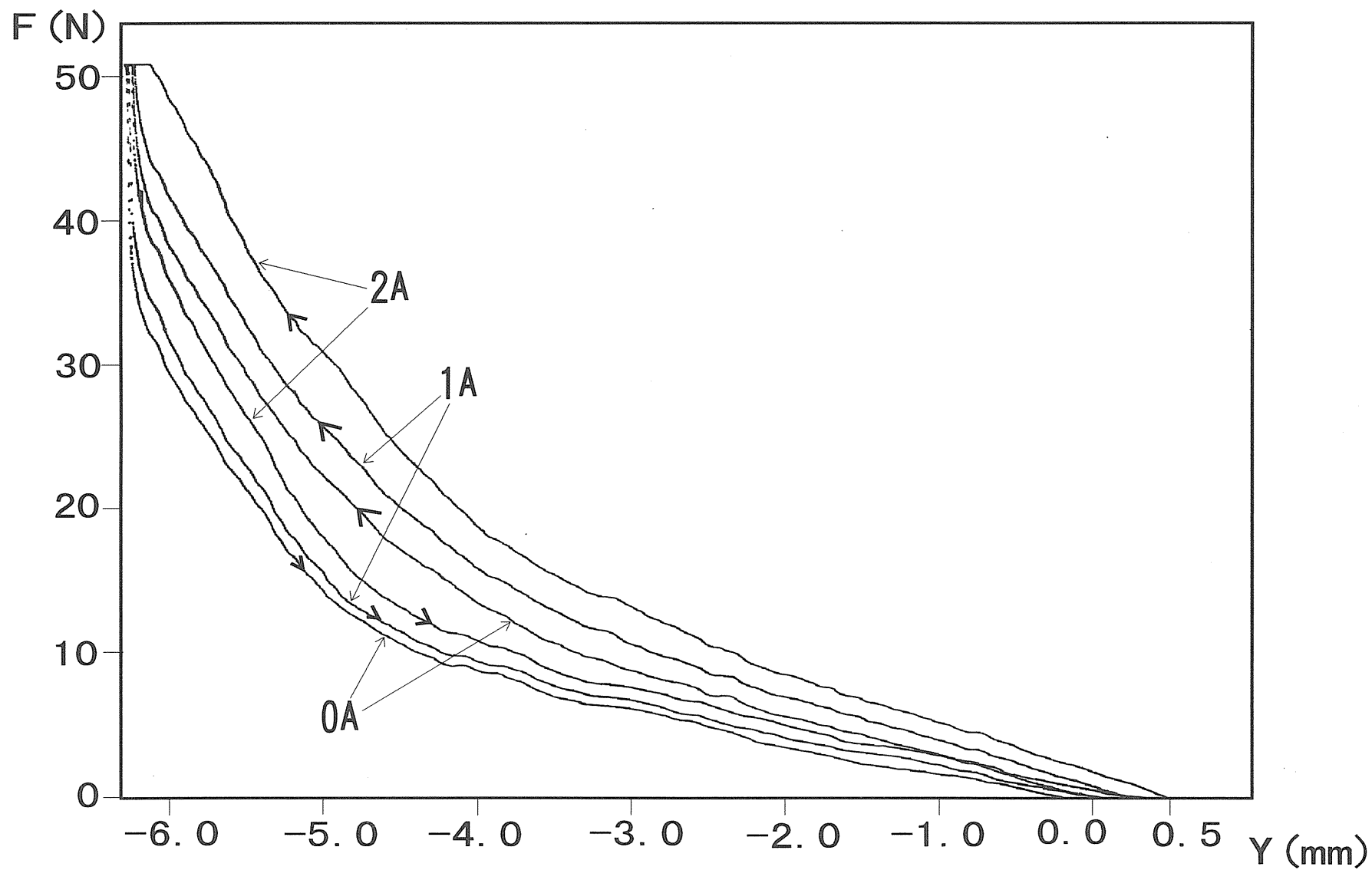


図6-9 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.2 (実験I)

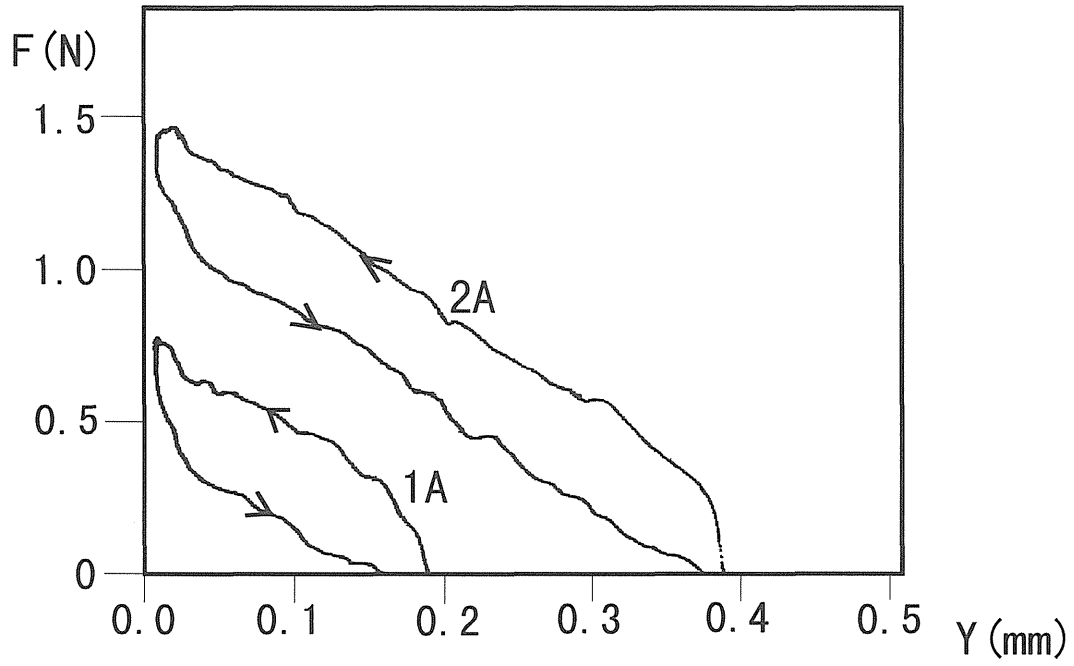


図6-10 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.2 (実験II)

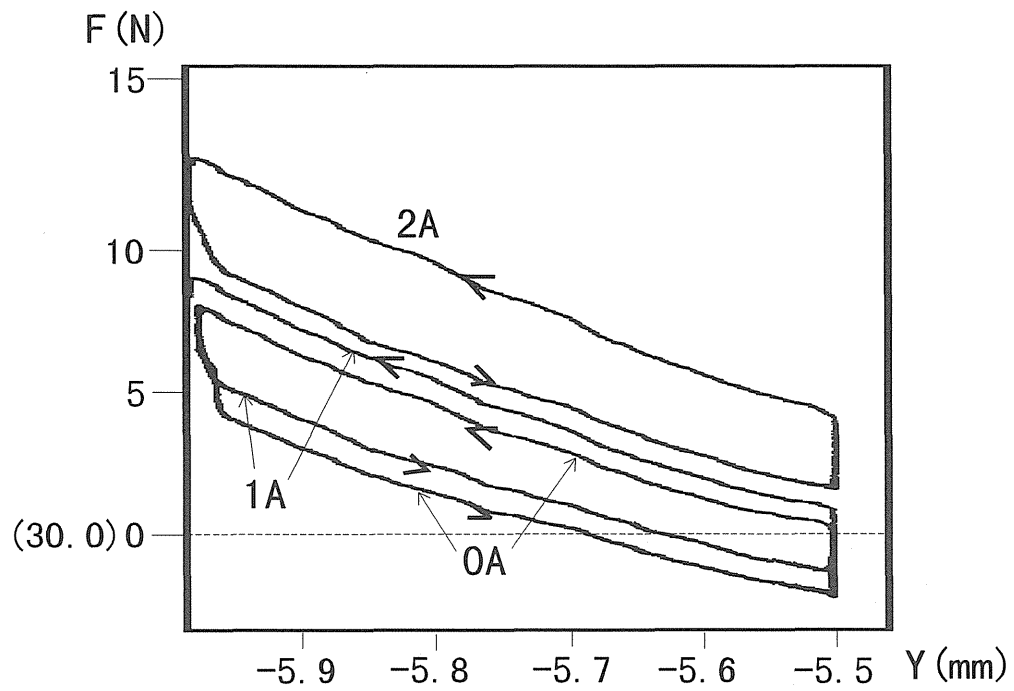


図6-11 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.2 (実験III)

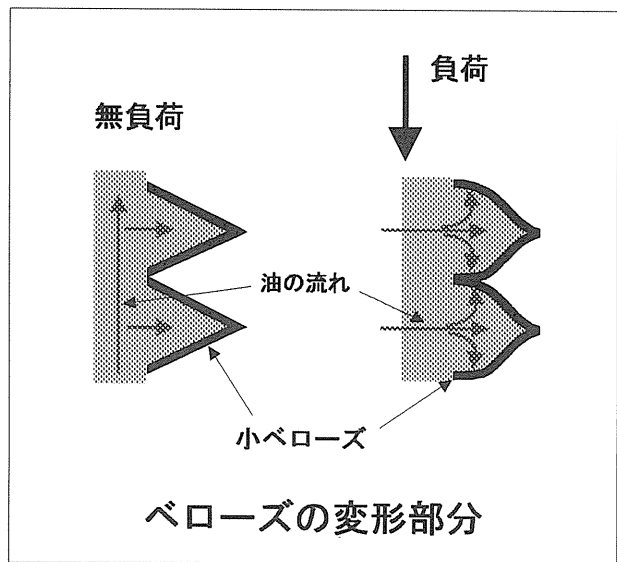
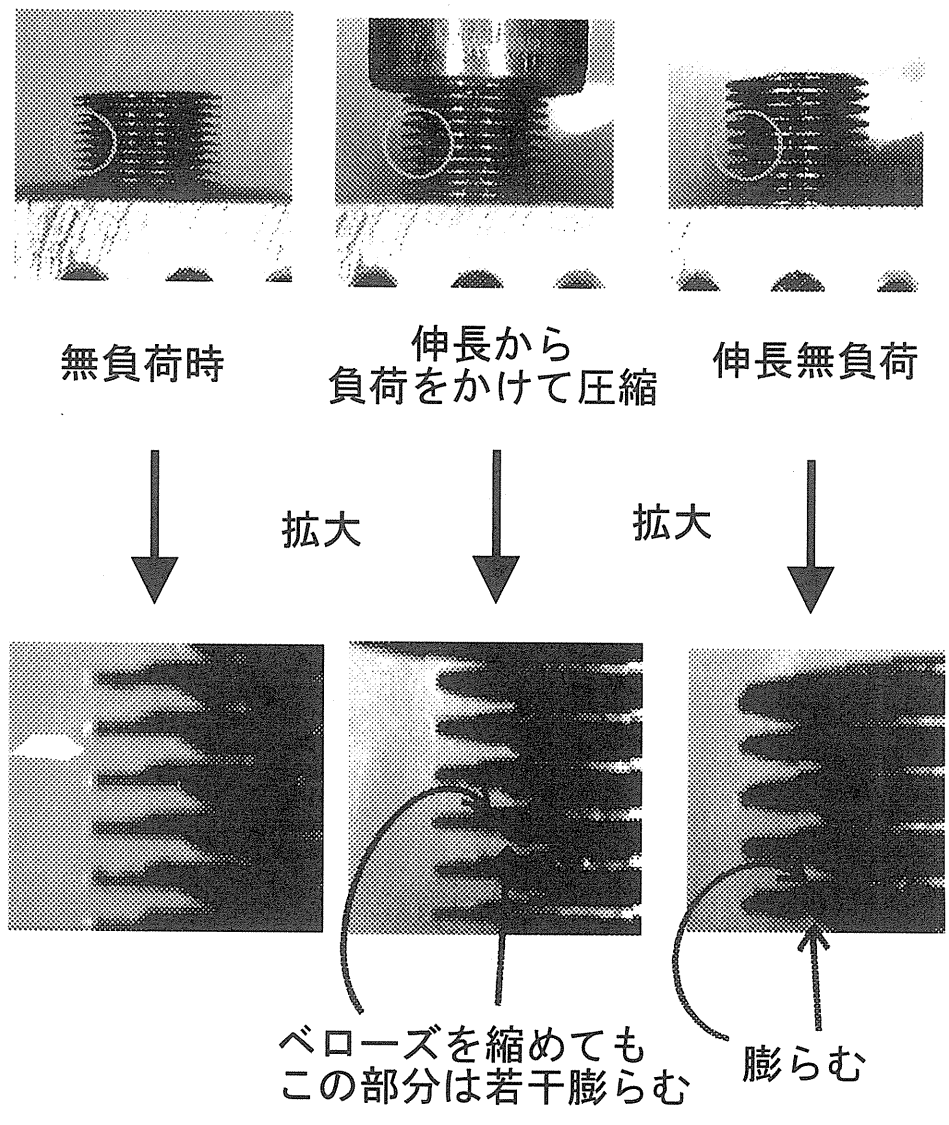


図6-12 ベローズの変形

6-2-4 考察

実験（Ⅰ）の結果を見ると、アクチュエータ no.1の方がアクチュエータ no.2より変位、推力ともに僅かに大きいがほぼ似た曲線の形であり、推力の増加がピストンの場合よりかなり緩やかである。出力変化が小さい原因としては、ベローズ軸方向以外の変形が考えられる。小ベローズを拡大して撮った写真を図6-12に示す。小ベローズに負荷がかかると、無負荷時には見られなかったベローズ自身の変形が僅かながら生じていて、これは内圧が上昇して変位増幅に寄与しないベローズ軸方向以外の体積変化が生じていることが確認できる。このためベローズに負荷がかかると内部流体が半径方向に逃げてしまい、変位と推力が同時に得られなくなると考えられる。

実験（Ⅱ）はピストン式超時歪アクチュエータの場合と同様の測定をしたもので、出力は1~1.5Nと小さい。

実験（Ⅲ）は出力変化が大きくなる5.5mmの位置まで小ベローズを予め圧縮してから測定したもので、実験（Ⅱ）より10倍ほど大きく10~15Nの出力変化が得られた。

6-3 磁場（電流）－変位出力特性の動特性の測定

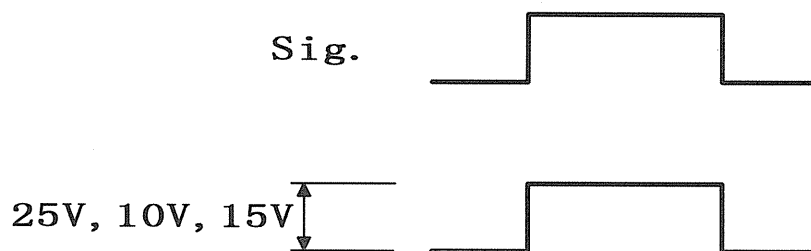
6-3-1 測定装置

図6-13に、測定に用いた装置の略図を示す。図のように従来のドライバーおよび高速ドライバーを取付け、関数発生器によりアクチュエータのステップ応答、周波数応答による動特性の測定を行う。アクチュエータの変位はギャップセンサを用いて測定する。

6-3-2 測定方法

以下の手順で行う。

- ① 図 6-13 のように設置する。
- ② 関数発生器を最初に低周波にする。
- ③ 定電圧電源を用いて、アクチュエータを一定電圧（ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.1 : 25V、ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.2 : 15V）で駆動する。そして下図のような信号波を送る。
- ⑤ オシロスコープのトリガー機能を使ってギャップセンサから変位の波形を取り込み、X-Yプロッタでデータを取る。
- ⑥ そのときのアクチュエータの変位と応答性を波形から算出する。
- ⑦ 周波数を変えて測定を行う。



6-3-3 測定結果

実験の測定結果を図 6-14～図 6-23 に示す。

- ・ 図 6-14～図 6-18 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.1
- ・ 図 6-19～図 6-23 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.2

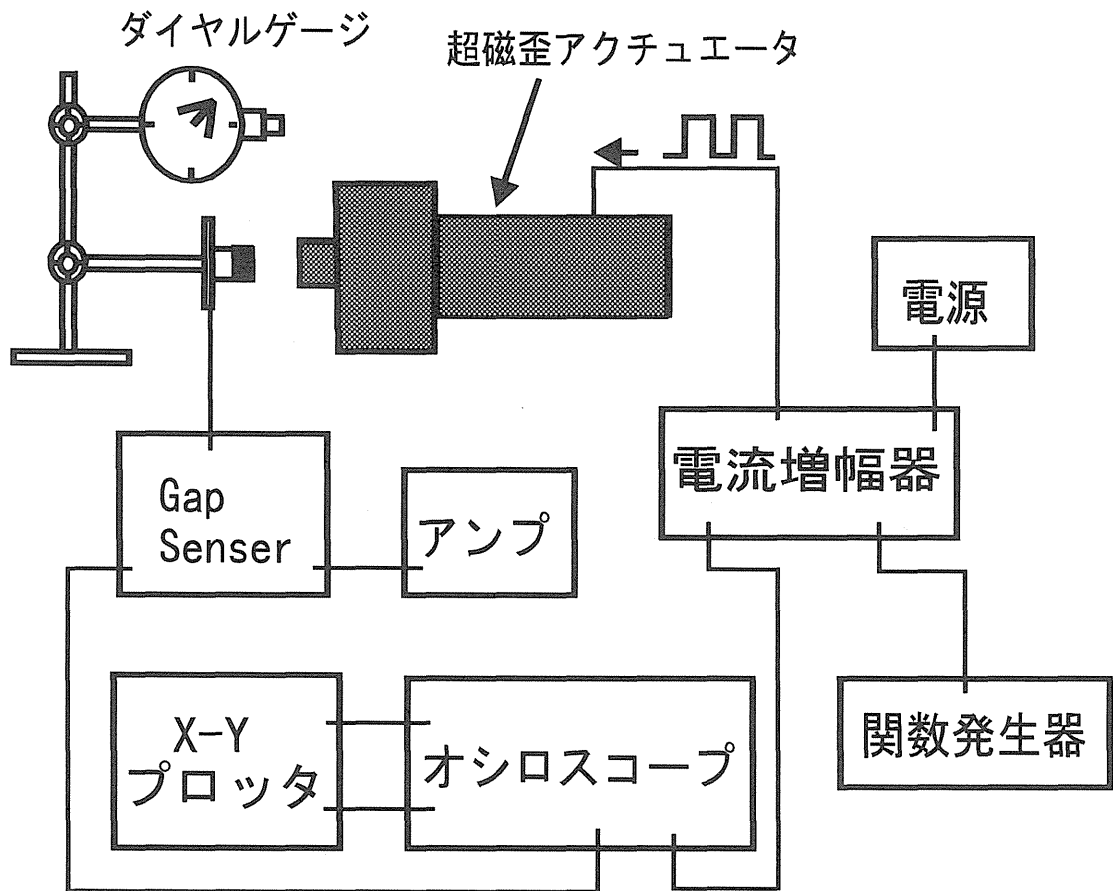


図6-13 ベローズ式超磁歪アクチュエータ
磁場（電流）-変位出力特性の動特性の測定

図6-14 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.1 (25V)

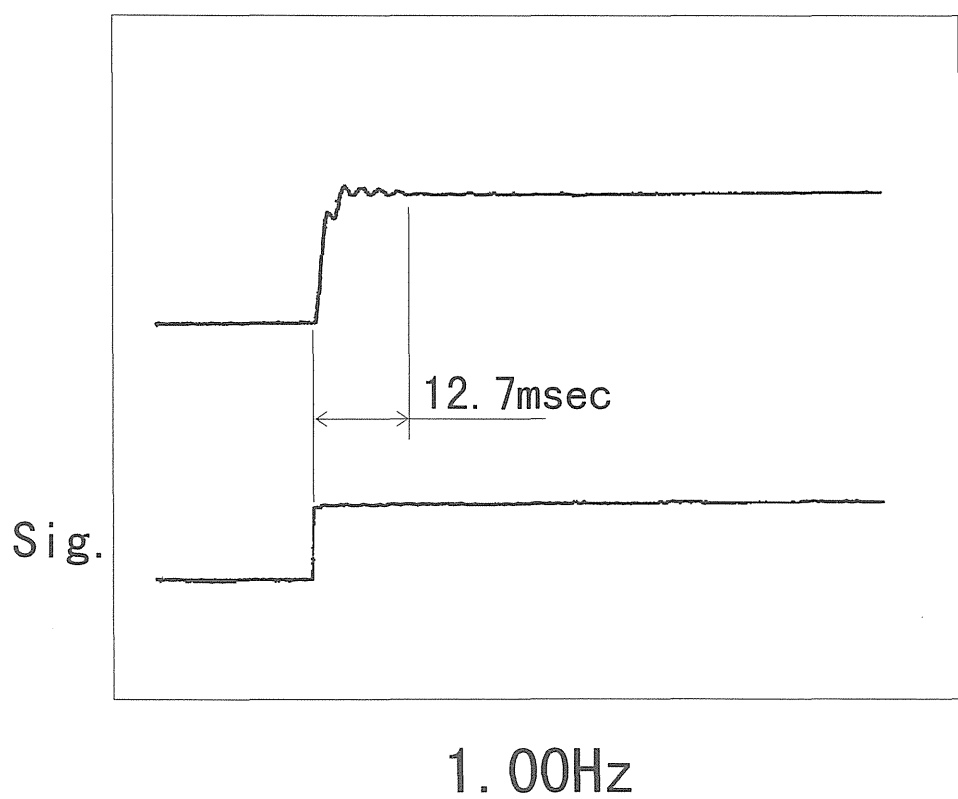
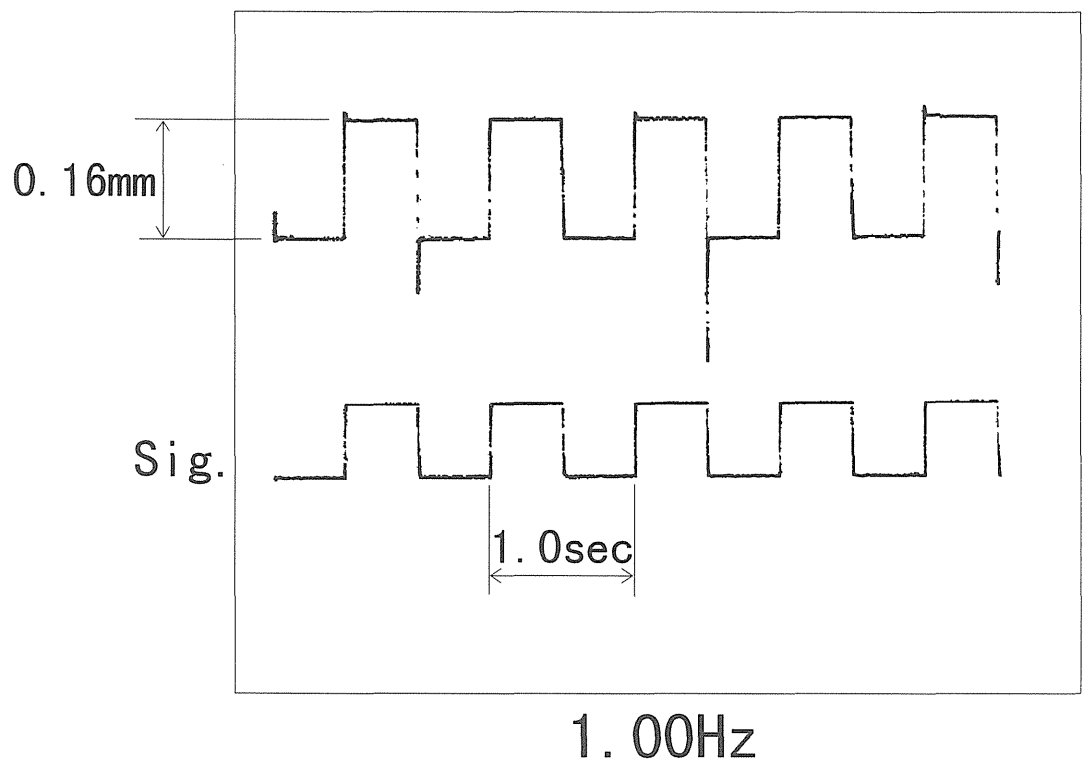


図6-15 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.1 (25V)

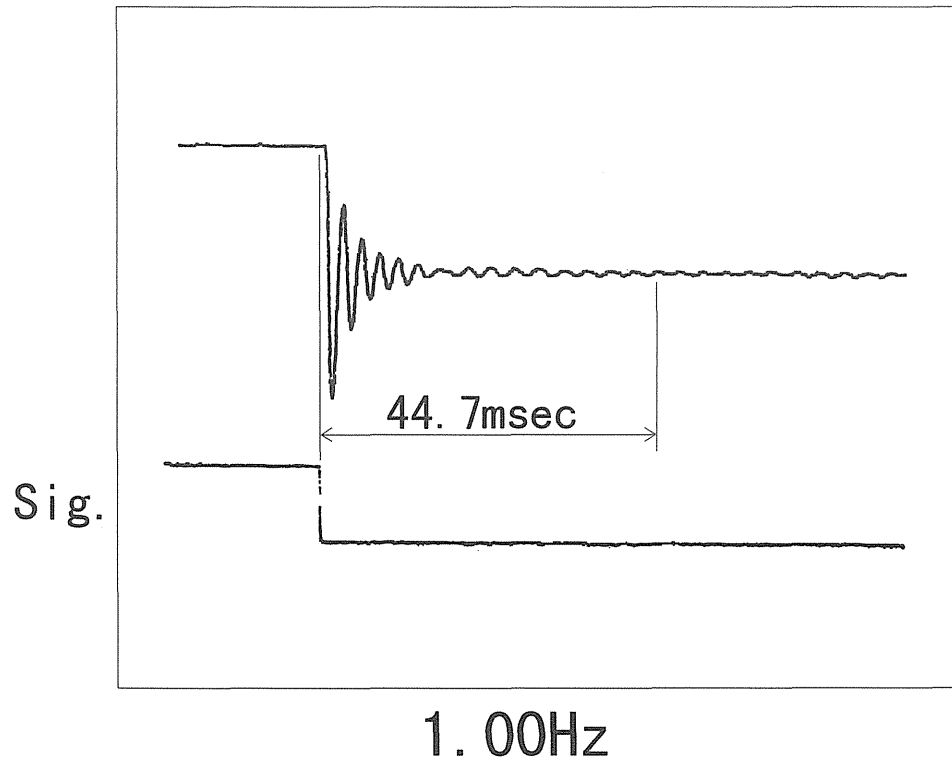
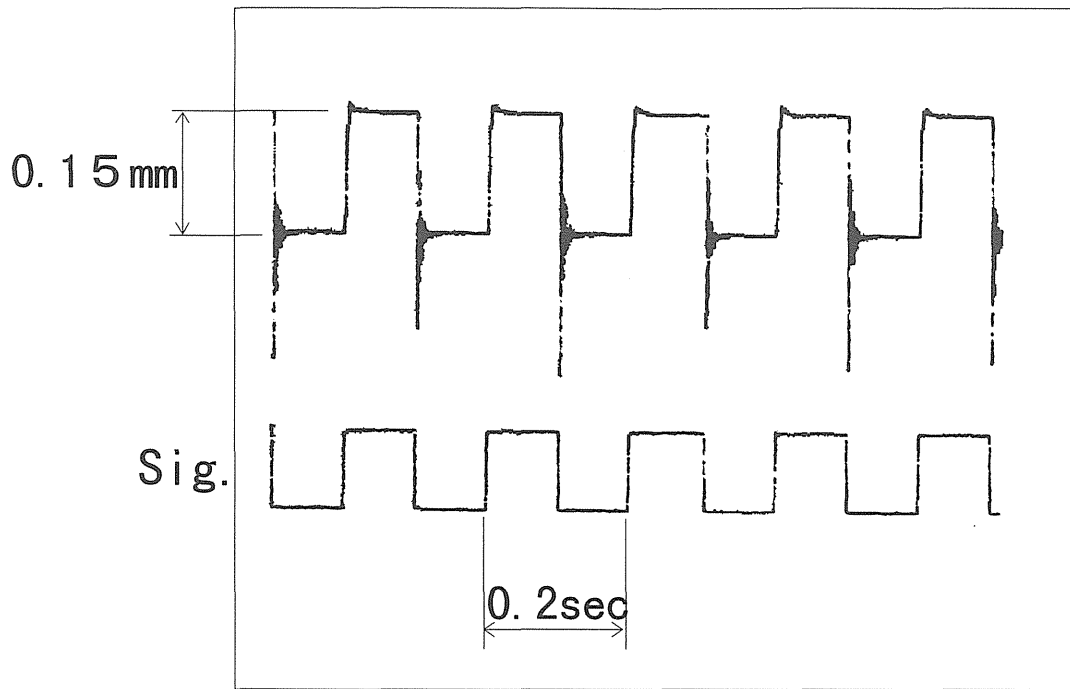
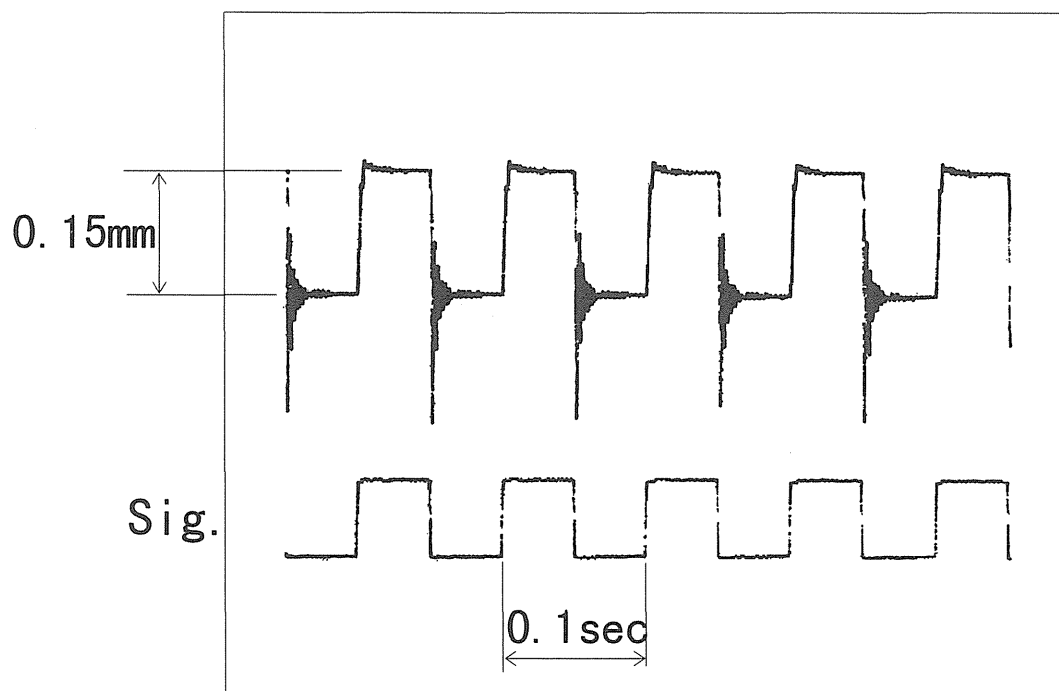


図6-16 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.1 (25V)

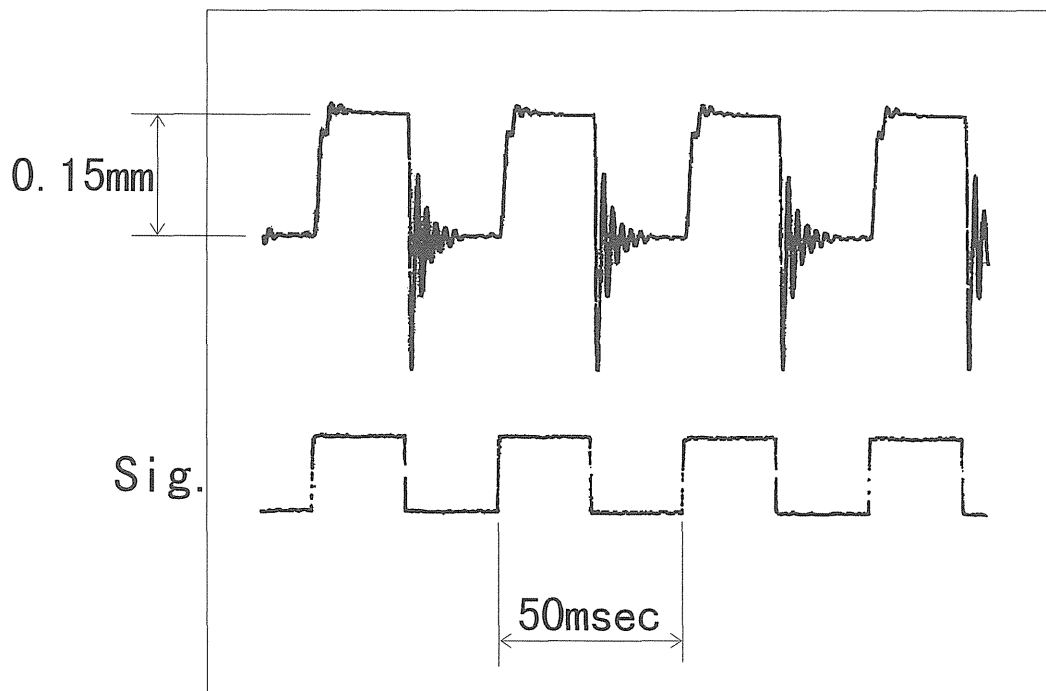


5.00Hz

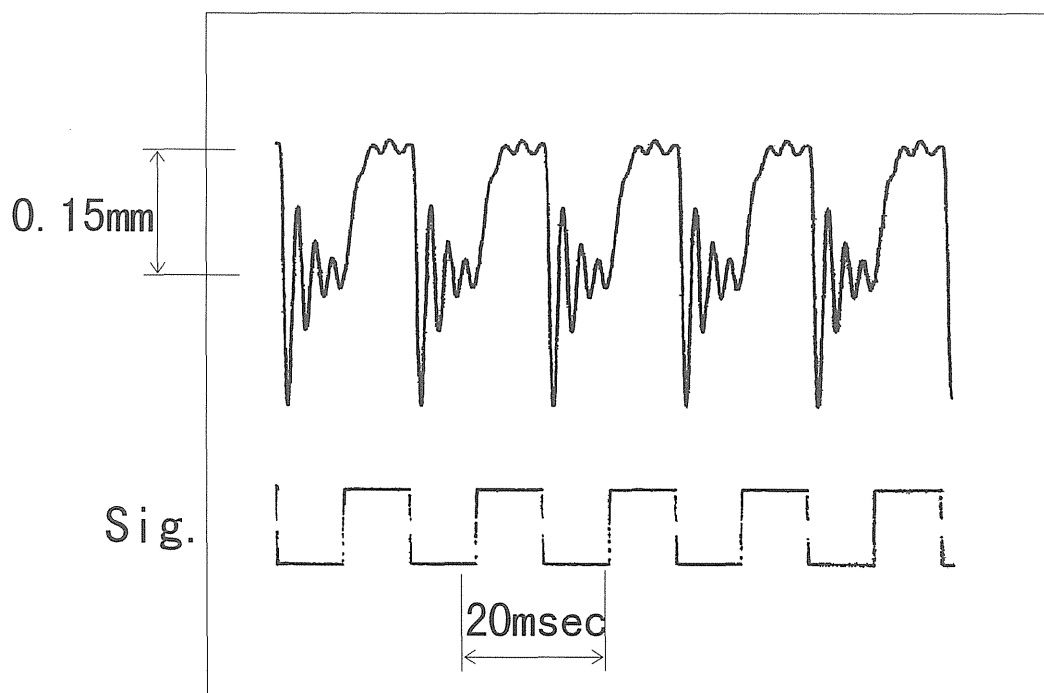


10.0Hz

図6-17 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.1 (25V)



20.0Hz



50.0Hz

図6-18 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.1 (25V)

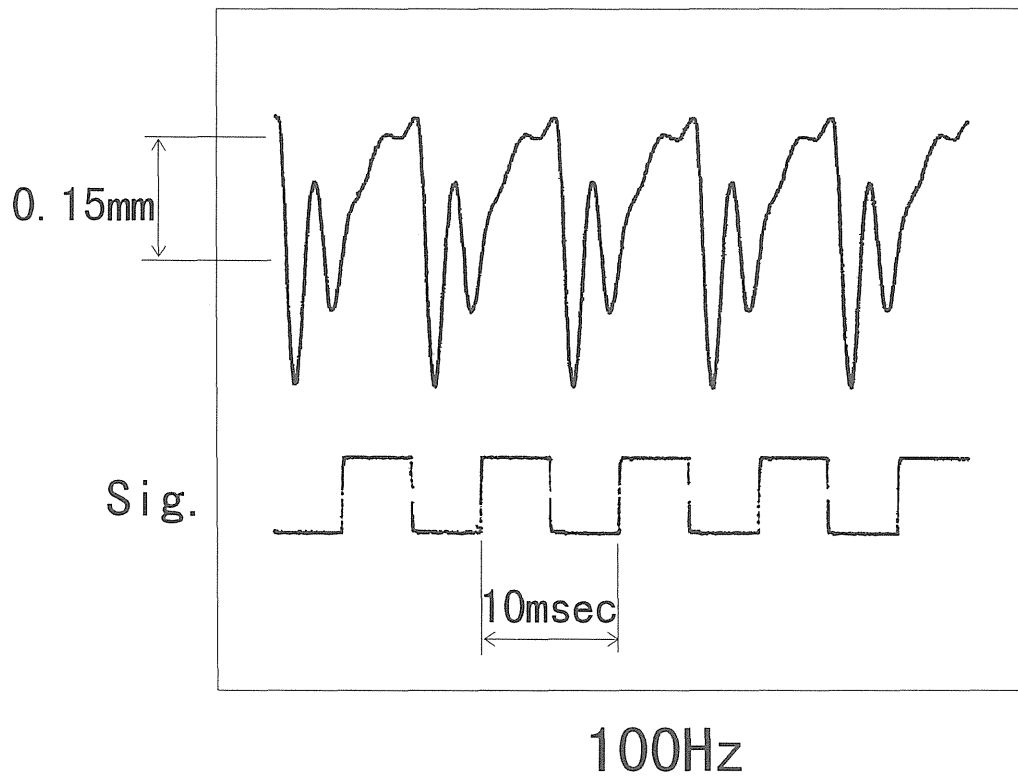


図6-19 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.2 (15V)

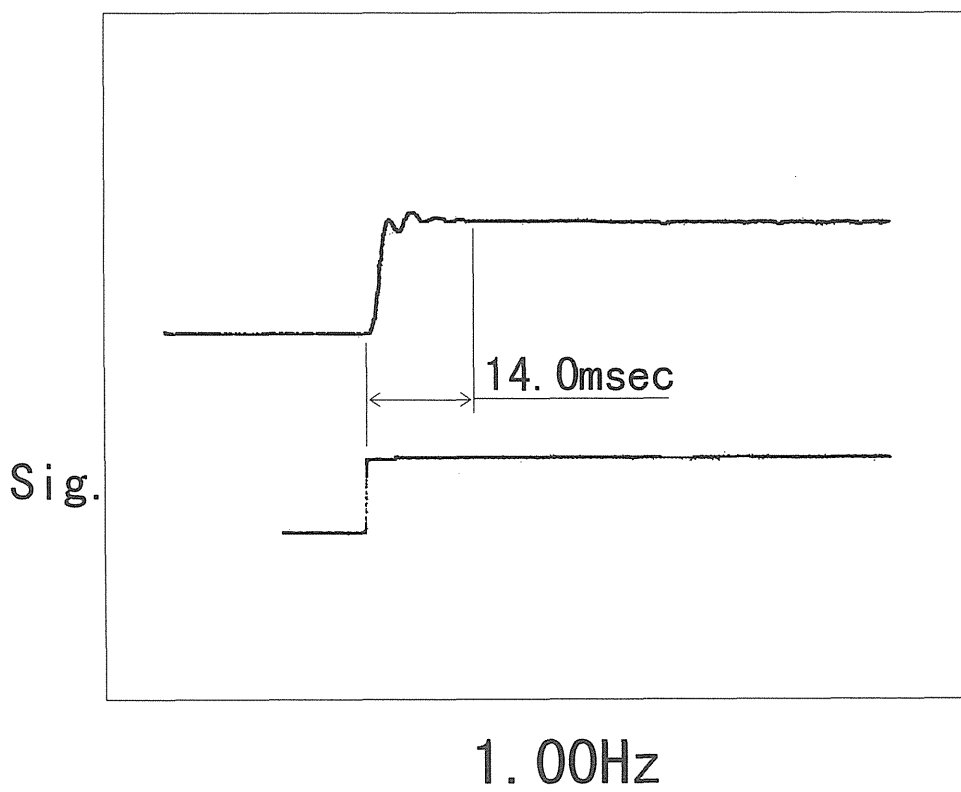
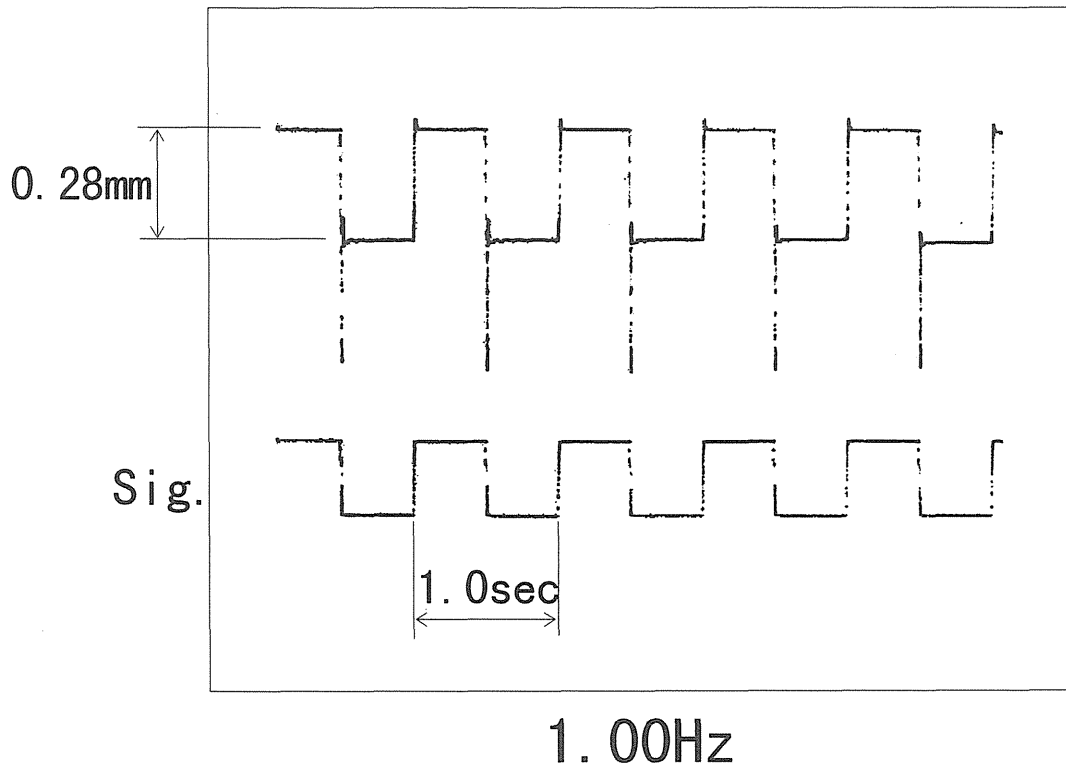


図6-20 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.2 (15V)

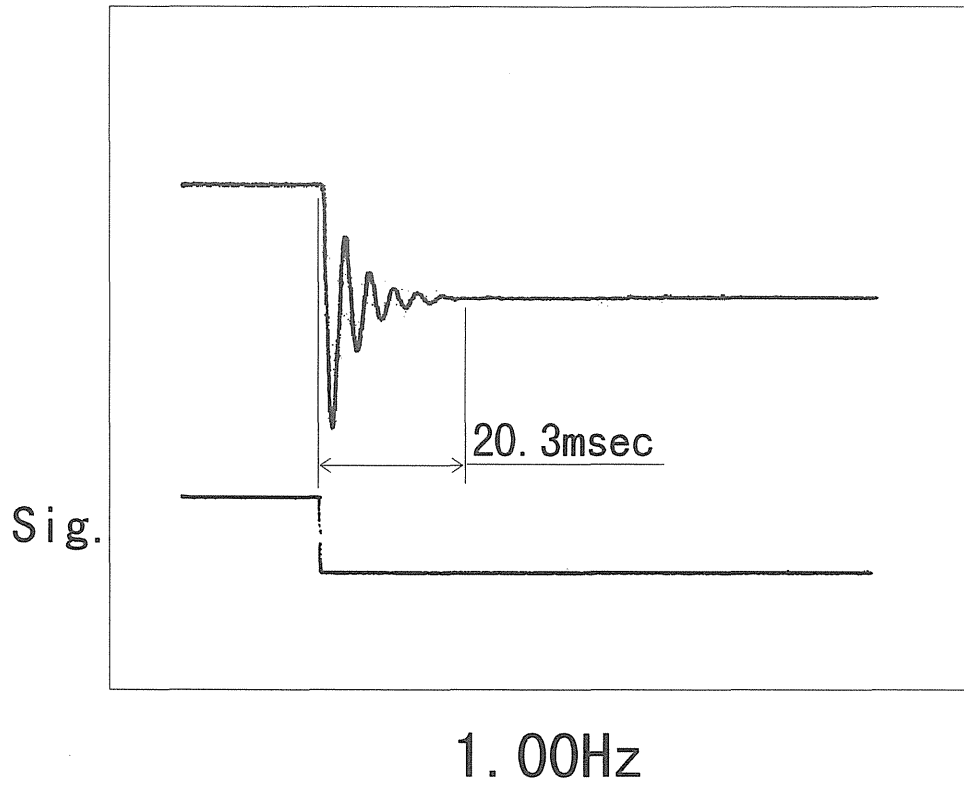
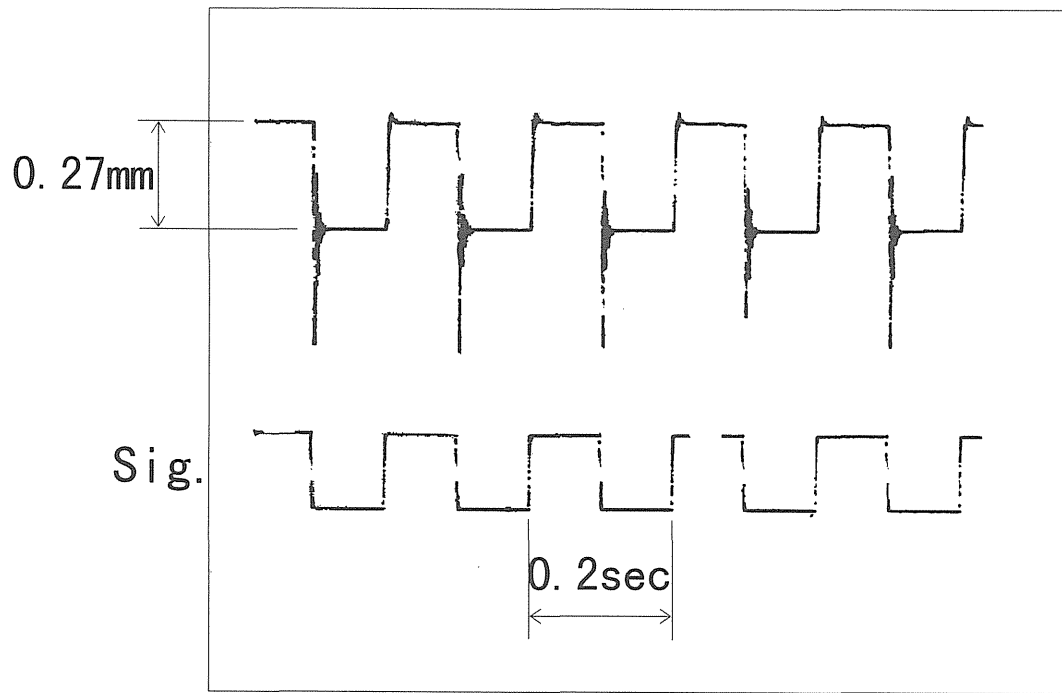
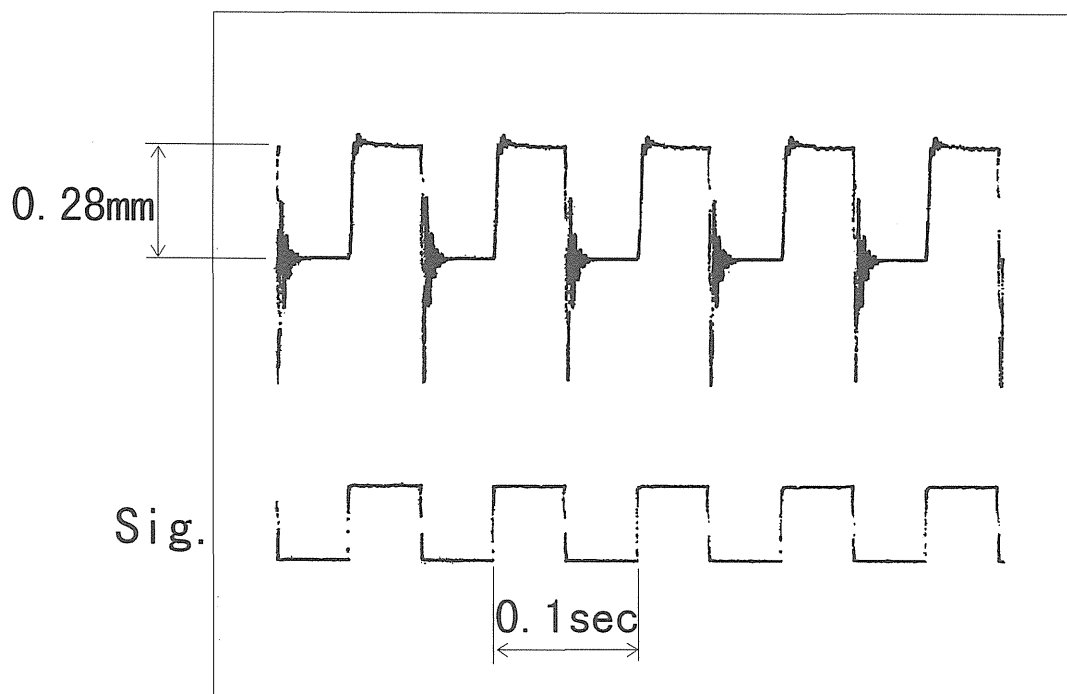


図6-21 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.2 (15V)



5.00Hz



10.0Hz

図 6-22 ベローズ式超磁歪アクチュエータ no. 2 (15V)

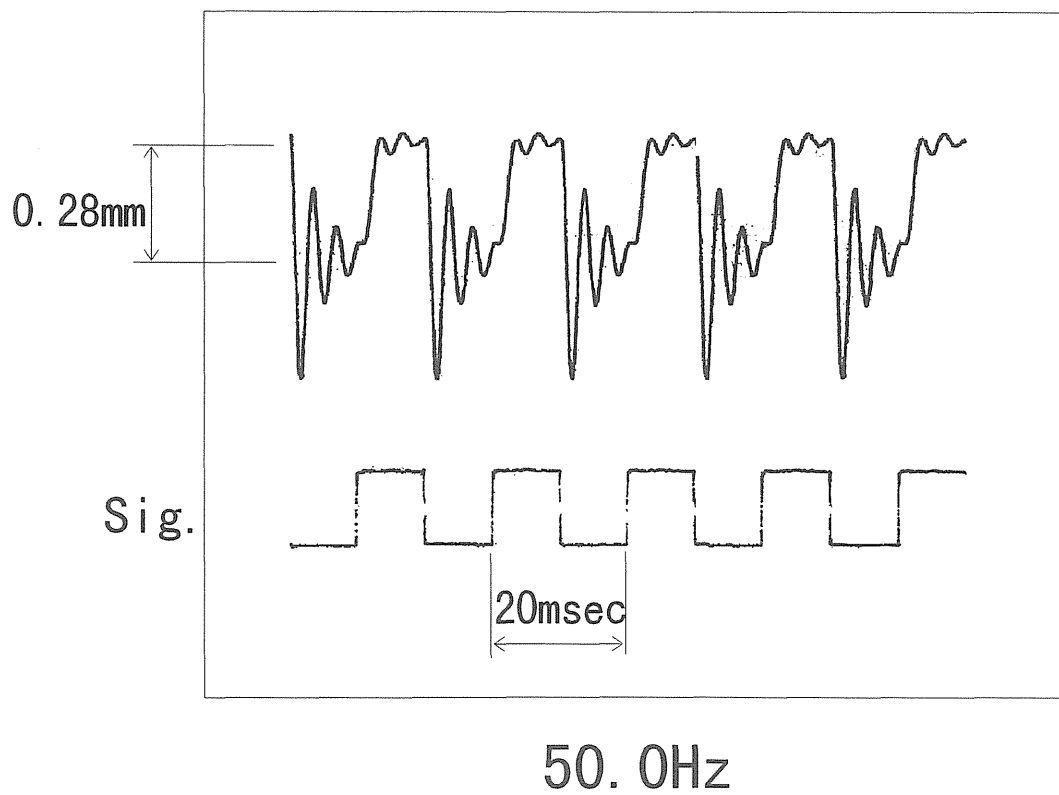
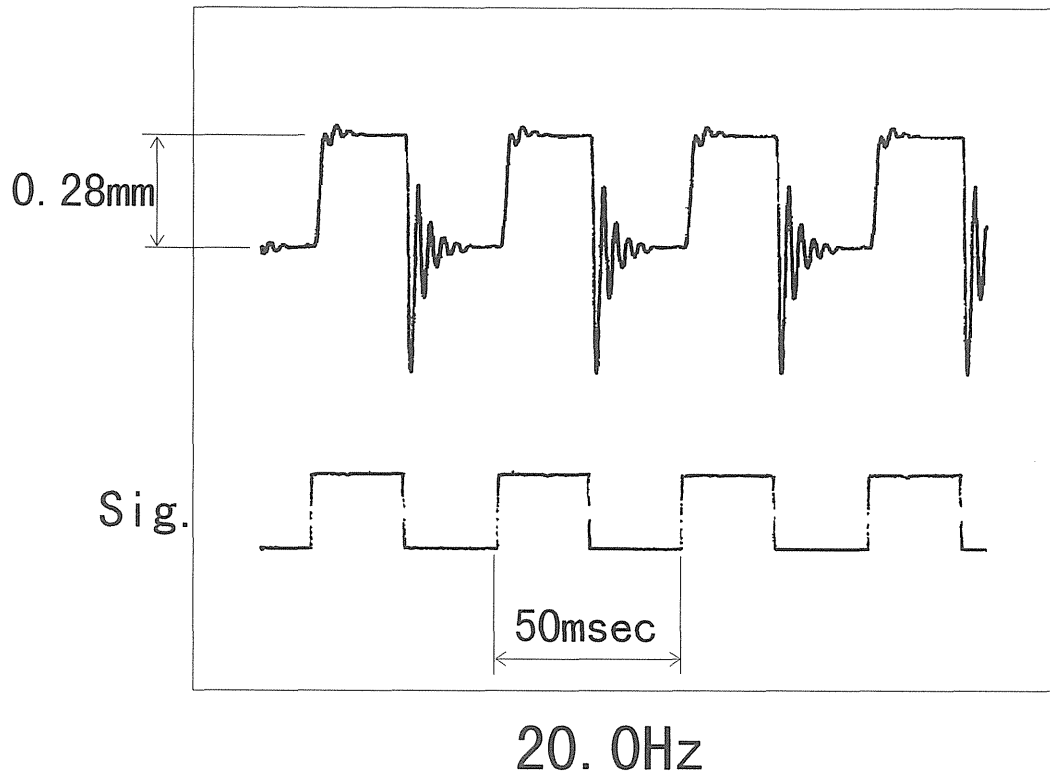
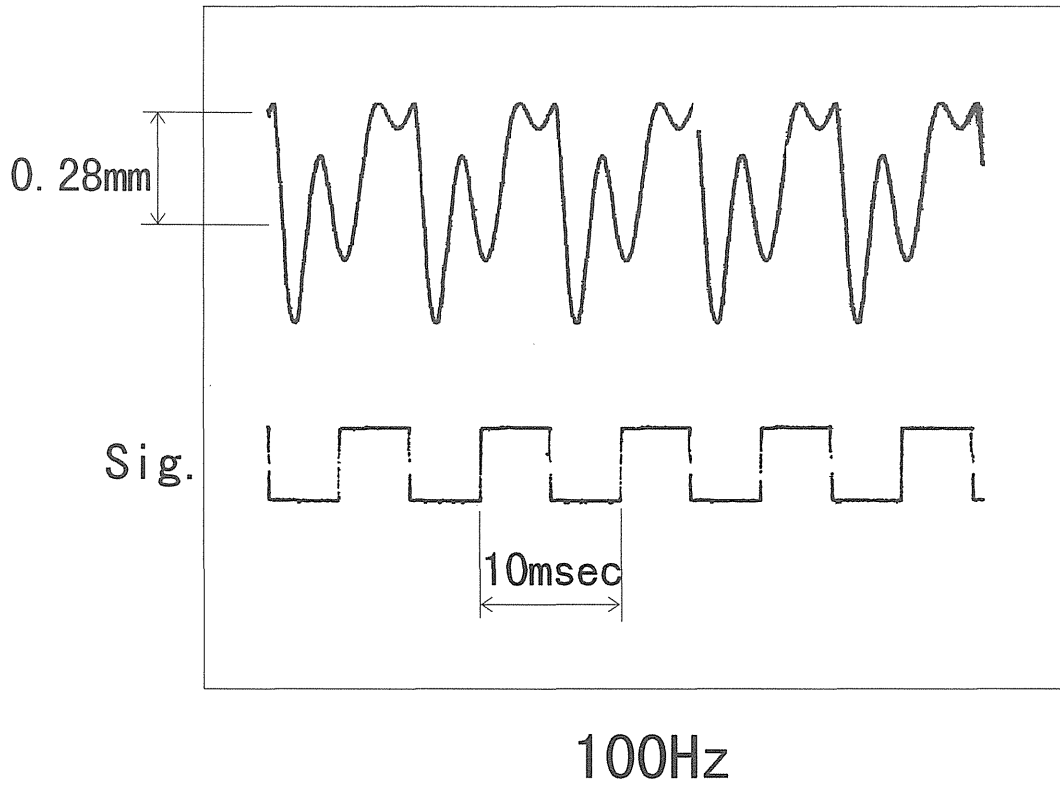


図6-23 ベローズ式超磁歪アクチュエータno.2 (15V)



6-3-4 考察

ベローズ式超磁歪アクチュエータ no.1、no.2 とともに6倍程度の変位増幅が得られ、変位はそれぞれ0.16mm、0.28mm (1Hz) であった。ベローズを用いたことにより封入流体を密封することができ、内部からの流体のリークを無くした為、ピストン式の場合よりも大変位を得ることができた。

信号のON、OFF時の応答の行き過ぎ量はアクチュエータ no.1 で5.8%、93.5%、アクチュエータ no.2 で6.7%、114%である。ON、OFF時で応答の形が違ってくるのは、増幅率を安定させるため大ベローズをある程度圧縮した状態を初期状態に設定しているため、小ベローズが最大作動長を大きく越えてしまっているためである。振幅減衰比はアクチュエータ no.1、no.2 とともに0.4であった。

第7章 超磁歪素子を用いた高速オンオフ弁の開発と特性試験

7-1 超磁歪高速電磁弁の開発の背景

油圧システムにおいて電子-油圧インターフェイスの役割を担う高速電磁弁の駆動は、電磁力によるコイル内可動鉄心（プランジヤ）の直線運動によってなされる。駆動電子回路や磁性材の改良によりその応答性は向上しているが、さらに高応答な作動の要求は強い。これに替わる電子-機械変換デバイスとして、圧電素子(PZT)、電歪素子(PMN)や超磁歪素子(Terfenol-D など)を用いた高速直動アクチュエータが開発され⁽⁵⁾⁽⁷⁾、油圧制御弁の駆動に応用されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。特に、超磁歪素子は磁界中において高応答（応答性数 kHz）で歪む（伸びる）という性質から、従来の電磁弁と同様に、コイルによる低インピーダンス駆動に適し、また圧電素子に比べて大きな歪率と出力が得られるので、電磁弁駆動用アクチュエータとしての応用が期待されている。超磁歪素子の油圧制御弁への適用例として、近年、弁ストローク 50 μm の直動形サーボ弁⁽¹⁰⁾、レバー式変位拡大機構を用いたスプール弁（Maryland 社）、サーボ弁用超磁歪アクチュエータ（スエーデン王立工科大）、超磁歪式燃料噴射弁が報告されているが、実用例はまだ少ない。超磁歪素子は現状では高価で、得られる変位もプランジヤ形ソレノイドに比べて小さいなどの問題点を抱えているが、油圧制御弁への適用を検討することは今後の電磁弁の高応答化手段としても重要である。開発した電磁弁は、超磁歪素子を用いたストローク 0.4mm の ON/OFF アクチュエータで駆動する 3 ポート形高速電磁弁であり、パルス幅変調(PWM)方式による圧力制御に応用するとともに、有限要素法によるソレノイド励磁方式の検討をおこなったのでその結果を示す。

7-2 超磁歪高速電磁弁の構造

超磁歪素子の磁場-歪特性は非線形でヒステリシスを有するため、サーボ弁などのスプールの位置制御に適用するためには、弁ストロークを位置センサで検出する閉ループ制御とバイアス磁界（正負の歪を得るためのオフセット）の印加が必要となる。本研究では、位置センサの搭載を避けて簡素化をはかるため、駆動は簡単な ON/OFF 的作動とし、PWM 方式により平均的な流体出力を制御するものとする。

図 7-1 に超磁歪高速電磁弁の構造を示す。ON/OFF アクチュエータ部は、①超磁歪素子(ϕ 10 mm \times 78 mm)($\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.9}$)と②コイル(1380 TURN, 6.5 Ω)、③ヨーク(SUM22)からなる。図 7-2 の歪特性をもとに歪率 $=0.5\times 10^{-3}$ を設計点(磁界の強さ $=40$ kA/m, 励磁電流 $=2$ A)とすると、変位量は 30 μm 程度で実用には小さいため、パスカルの原理を用いたピストン式変位増幅機構を使用する。ピストン式を選定した理由では、ピストン式流体変位増幅機構とベローズ形変位増幅機構の特性を比較した際、ピストン式流体増幅機構は剛性が高い、封入

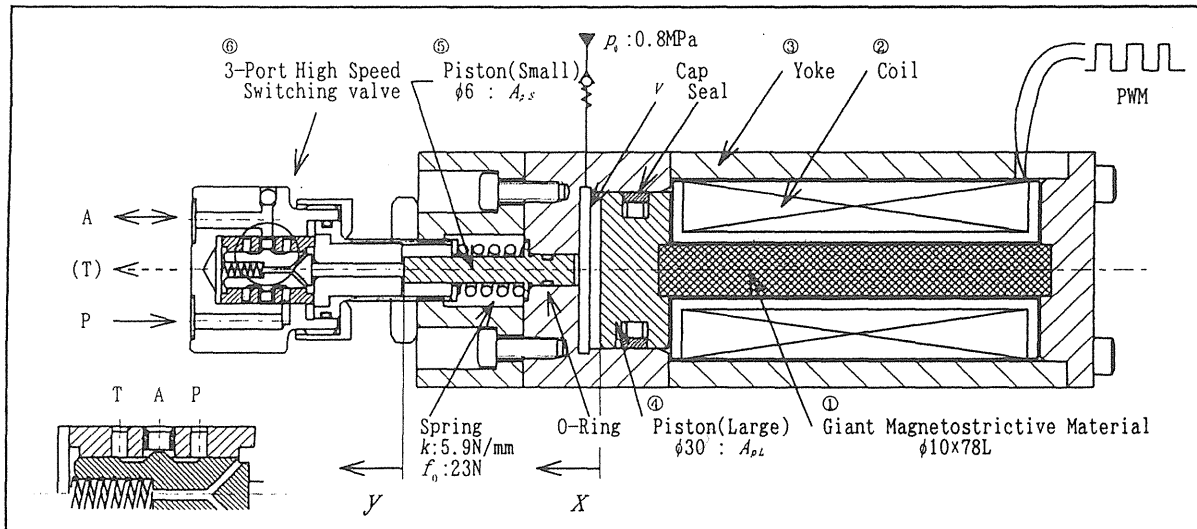


図 7 - 1 超磁歪高速電磁弁(3-PORT)

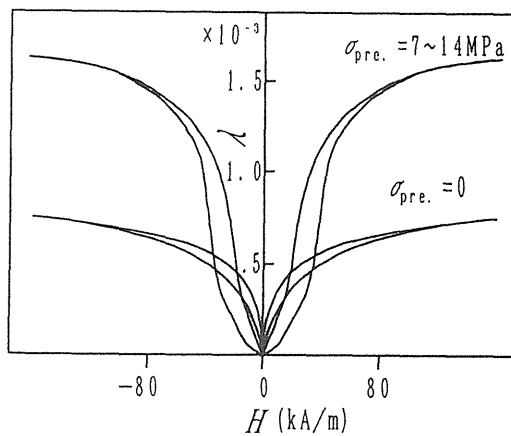


図 7 - 2 磁場-歪特性 ($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$)
(ユニポーラ電源により正磁界側で超磁歪素子を駆動)

流体の補給も油圧回路から容易に取り出せるとの利点があることによる。本機では④大ピストン(ϕ 30mm)、⑤小ピストン(ϕ 6mm)により増幅率=25 となり、理論変位量は 0.8mm となる。封入流体は VG32 相当作動油で、この封入圧力と

小ピストン押さえばねの初期圧縮荷重の設定により、超磁歪素子に適当な予圧縮応力を作用する。また、漏れによる封入流体の流出に対しては、外部よりチェック弁を介して補給する（通常はシールが有効に機能しており、漏れは非常に少ない）。⑥弁部は市販の3ポート形高速電磁弁の弁部(ポペットφ6 mm, ストローク0.25mm)を流用している。図7-3に超磁歪高速電磁弁の写真を示す。

固有振動数の設計値は800Hzとした。実際の増幅率は、押さえばね反力、シール部の変形、摩擦、空気の混入による体積弾性係数の低下により、小さくなる。特に、空気の混入は固有振動数の低下を招くため注意を要する。

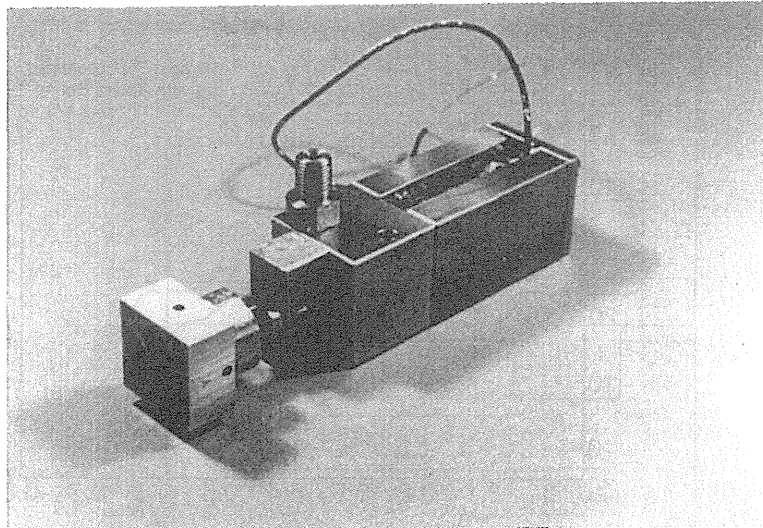


図7-3 超磁歪高速電磁弁

図7-4は超磁歪アクチュエータの変位と推力の関係を調べたもので、変位が大きくなるにしたがって推力は減少する。供試電磁弁に用いられていたプランジャ形ソレノイドより常に大きな推力を得るためには、弁の最大ストローク時(0.25mm)においてこれを上回る推力が必要である。しかしながら、実測した設計値=2Aにおける超磁歪アクチュエータの出力は、理論値の約1/2であり、最大ストローク時のプランジャ形ソレノイドより大きな推力は得られていない。この原因として、小ピストンOリングの摩擦、体積弾性係数の低下や要求される超磁歪素子の歪が得られていないことなどが考えられる。図7-5に超磁歪アクチュエータ（弁が付いていない状態）の動特性を示す。コイルの励磁電圧は、インダクタンスによる電流の応答遅れと、ヨークおよび超磁歪素子に生じる渦電流による高周波領域特性⁽¹¹⁾の劣化を補償するため、図7-6に示す電流立ち上がり時に過励磁をおこない、後に定常電圧を印加する電圧波形を用いた。0.25mmの変位に対して応答時間は0.6msである。図7-7は、各変調率 τ ($\tau=t_p/t_s$, t_p :パルスON時間, t_s :PWM変調周期)における超磁歪高速電磁弁の弁切り換えを測定したもので、搬送波周波数300HzにおけるPWM制御が可能である。

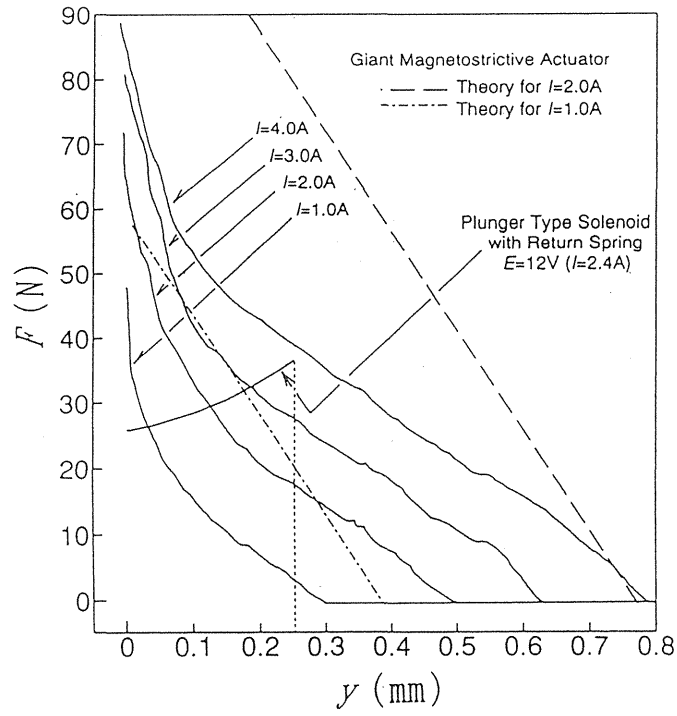


図 7-4 弁を駆動する超磁歪アクチュエータの変位—推力特性

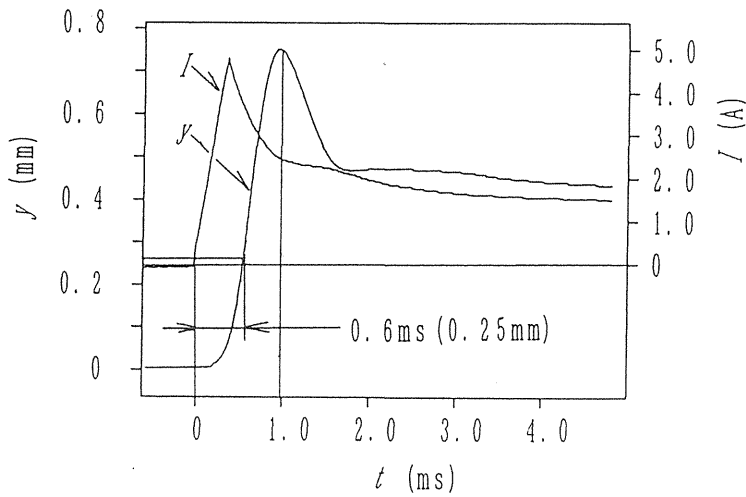


図 7-5 超磁歪アクチュエータの動特性
(図 7-6 の励磁電圧波形で駆動)

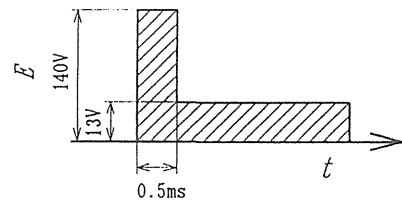


図 7-6 励磁電圧波形

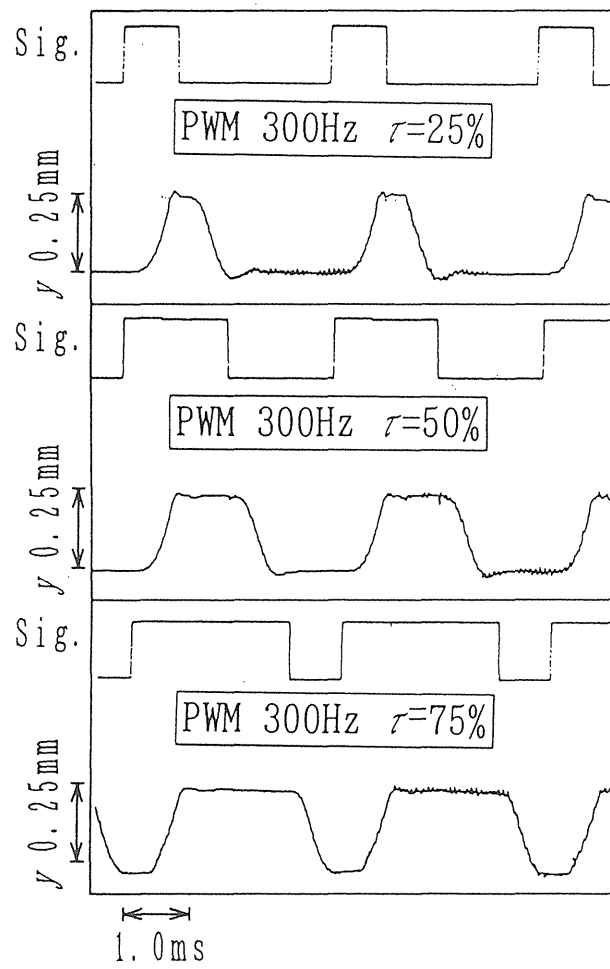
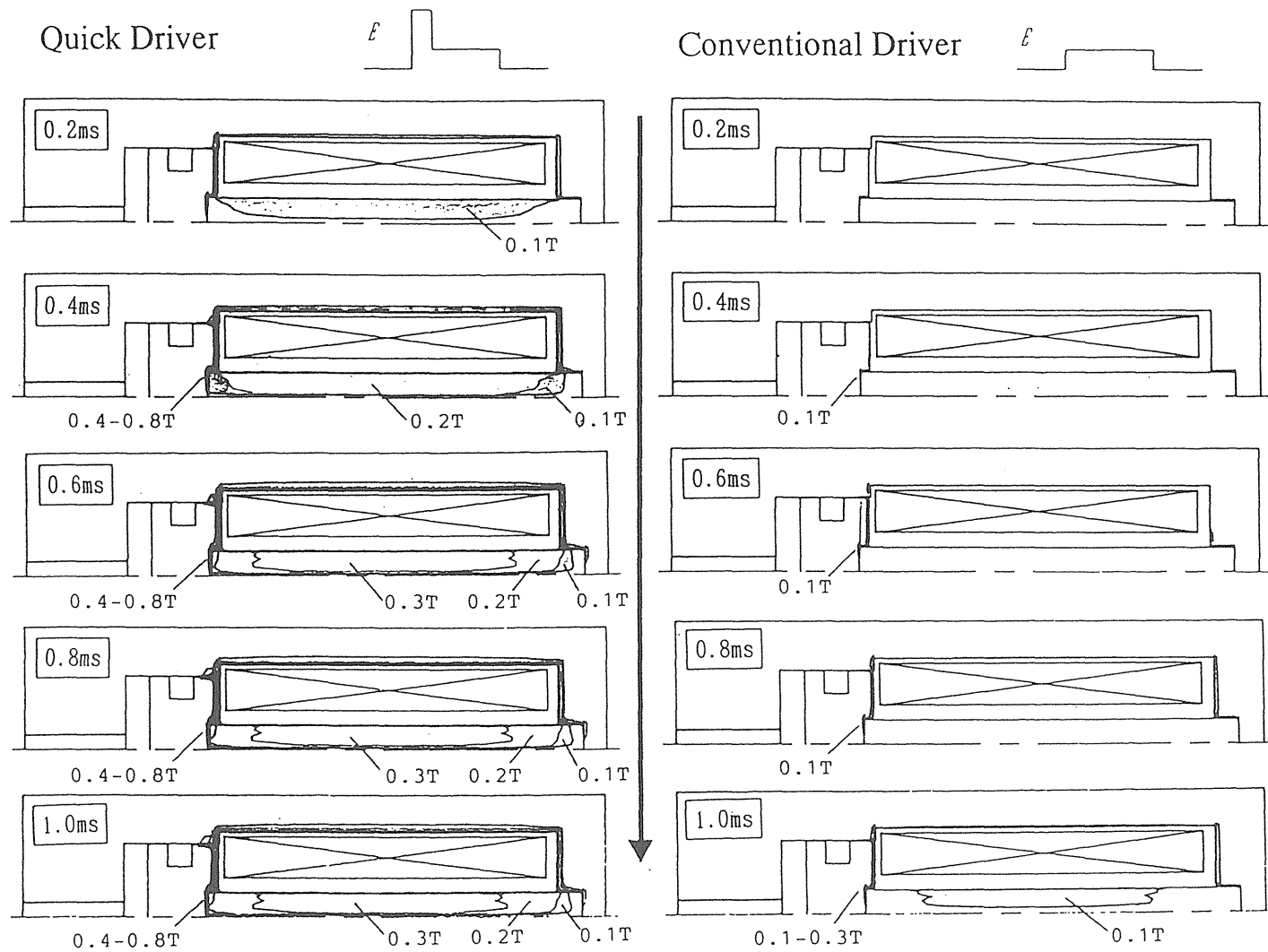


図7-7 超磁歪高速電磁弁の弁切換特性

7-3 FEM 非定常磁場解析による最適励磁方法の検討

弁を高応答で作動するためには、超磁歪素子を PWM 信号に応じて速やかに磁化する必要がある。励磁電圧パルス印加後の過渡的な磁化の様子を把握するため、FEM による非定常磁場解析をおこなった。解析モデルは軸対称三次元とし、磁気特性の非線形性、渦電流の影響を考慮した。図 7-8 (a)、(b) は電圧パルス印加後 1.0ms までの磁束密度分布を 0.2ms 毎に示したものである。図 7-9 (a) は図 7-6 に示した電圧波形に対する解析結果であり、図 7-8 (b) に示す過励磁をおこなわない場合に比べて、超磁歪素子が高応答で磁化していることがわかる。



(a) 過励磁, 140V-0.5ms

(b) 過励磁なし, ステップ電圧 13V

図 7-8 過渡磁束密度分布 (FEM 磁場解析 結果)

7-4 超磁歪高速電磁弁による高速流体パルス制御

弁の試験油圧回路を図7-9に示す。3ポート弁の供給(P)ポートは $p_s=7\text{MPa}$ 一定に設定されており、排出(T)ポートはタンクに、出力(A)ポートは可変絞り(負荷)と流量計に接続されている。Aポートと負荷絞り間の容積は $V_d=52\text{cm}^3$ である。

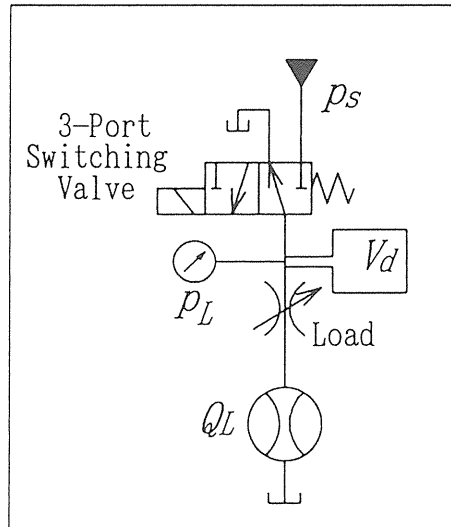


図7-9 超磁歪高速電磁弁 実験油圧回路

PWM制御3方向形高速電磁弁の理論流量特性は(7-1)式で与えられる。

$$Q_L^* = \tau\sqrt{1-p_L^*} - (1-\tau)\sqrt{p_L^*} \quad (7-1)$$

ただし、 $p_L^* = P_L/p_s$, $Q_L^* = Q_L/Q_s$

この流量特性は、 τ を弁開度に置き換えたアンダラップ形3ポートスプール弁の特性と等価なものとなる。図7-10に各変調率に対する p_L - Q_L 特性の測定結果を示す。実際の流量特性は、弁を制御する変調率が弁切換え時間を含むため、設定より小さい変調率の特性となる。

PWM制御3ポート形高速電磁弁の $Q=0$ における理論圧力制御特性は(7-2)式で与えられる。

$$p_L^* = \frac{\tau^2}{\tau^2 + (1-\tau)^2} \quad (7-2)$$

図7-11にPWM制御圧力制御特性の測定結果を示す。変調率 τ を変えること

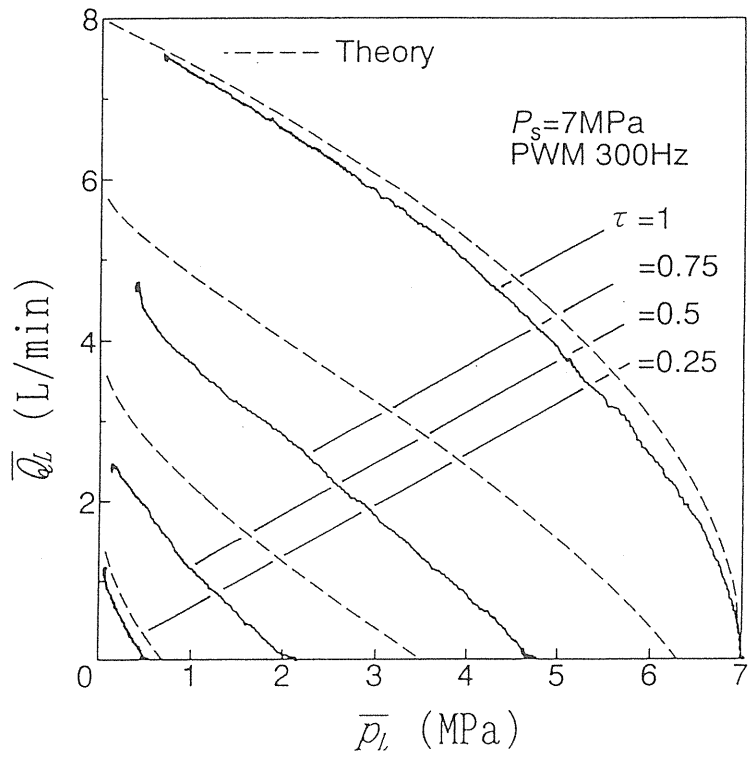


图 7-10 负荷压力—流量特性(PWM:300Hz)

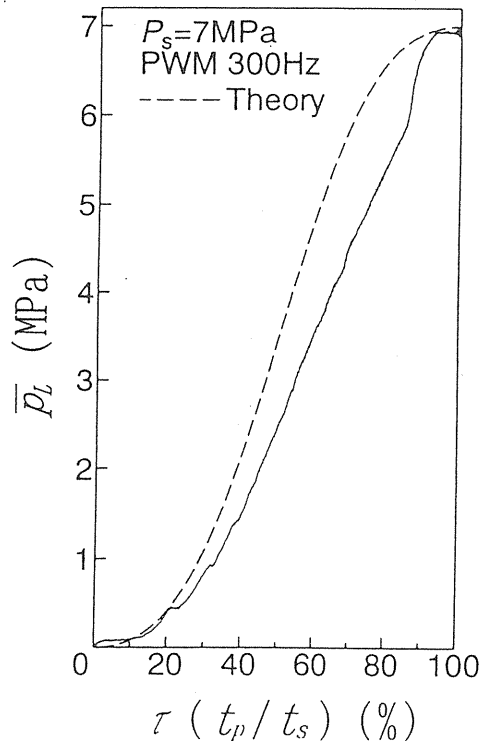


图 7-11 PWM 压力控制特性 ($Q_L=0$)

PWM 制御高速電磁弁は、流体パルス列を形成するため、出力圧力は脈動する。圧力脈動振幅が最も大きい変調率 $\tau=50\%$ における脈動率は、弁の運動を正弦波で近似すれば、概ね (7-3) 式となり、図 7-12 の線図で表される。

$$|p_a^*| = \frac{1}{\sqrt{1+8\pi^2 r^2}} \quad (7-3)$$

ここで、 $|p_a^*|$ は無次元振動圧力 ($p_a^* = p_a/p_s$)、 p_a は圧力脈動振幅、 $r = \frac{V_d p_s}{t_s Q_s \beta_e}$ である。図 7-13 は $\tau=50\%$ における負荷容積の圧力波形を測定したもので、圧力脈動の低減には t_s を小さく (PWM 搬送波周波数を高く) することが有効である。

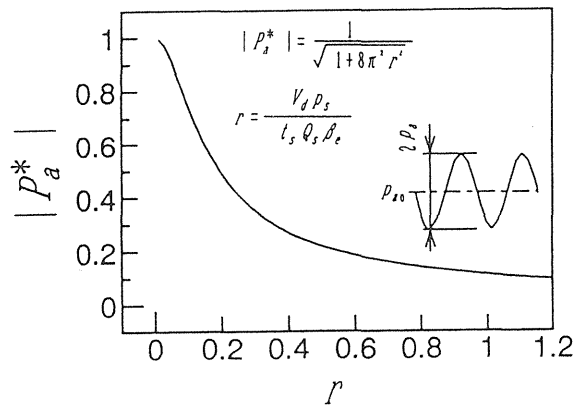


図 7-12 理論圧力脈動振幅

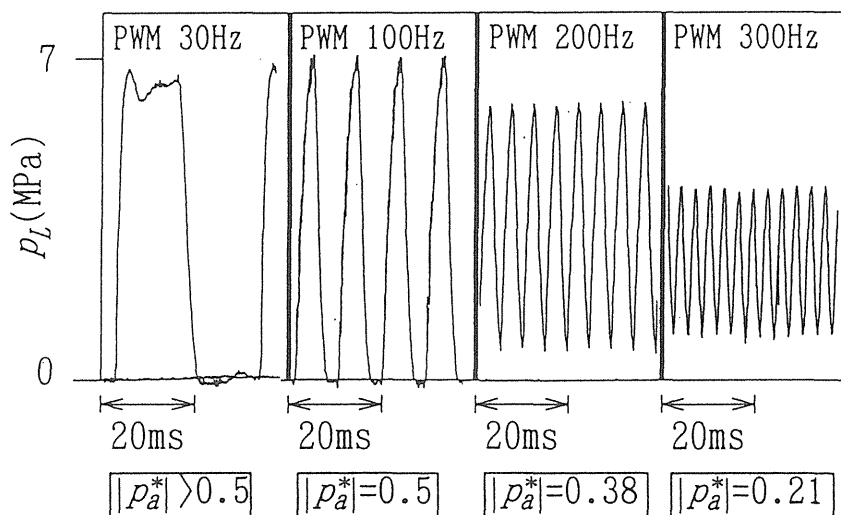


図 7-13 負荷容積における圧力脈動振幅 (実測値)

第8章 超磁歪アクチュエータを用いた燃料噴射装置の 構想と基本設計

8-1 高速高圧燃料噴射による排気ガス性状の向上

近年の環境保護に対する意識の高まりは著しく、ディーゼルエンジンの排ガス規制は年々厳しさを増している。ディーゼルエンジン排気ガスの窒素酸化物および排出微粒子の低減する手段として、噴射圧力100MPa以上(最高160MPa)の高圧燃料噴射が効果があることが知られており、近年この目的のためにジャーク式噴射系およびコモンレール式噴射系の高圧化対応への研究開発が進められている。しかしながら、単なる噴射圧力の高圧化だけでは排ガス性状改善としては不十分であり、さらにエンジン低速域における良好な噴射特性、運転条件に応じた噴射圧力、噴射時期、噴射率の可変制御が必要とされる。本研究では、超磁歪素子の高速応答性を利用した高圧高速燃料噴射弁の基本設計を行った。本研究で設計した燃料噴射弁は、超磁歪素子アクチュエータにより駆動するパイロット弁で、流体式の位置フィードバック機構を有するシート形主弁を制御するもので、高速に主弁のリフト量制御を行うことにより、噴射圧力、噴射時期、噴射率を電子制御できる。

8-2 パイロット弁制御式燃料噴射弁の構造

本研究で設計する燃料噴射弁の作動は、比例シート弁構造を利用したパイロット弁制御式とする。比例シート弁構造の作動原理を図8-1に示す。比例シート弁は、シート形の主弁とそれを制御するパイロット弁で構成される。主弁はランド部の一部に直列絞り(フィードバック流路, 幅 W_c)を有し、この流路はコントロール室と x_l のアンダーラップがある。パイロット弁を操作することにより、以下のように主弁変位の制御がおこなえる。

パイロット弁が閉じた状態($A_p=0$)では、供給圧力 P_s とコントロール室圧力 P_c とはフィードバック流路を介して等しく($P_s=P_c$)、受圧面積の関係($A_s < A_c$)から主弁は弁座に押し付けられ閉じている($x=0, Q_r=0$)。

パイロット弁が開くにつれて($A_p > 0$)コントロール室圧力 P_c が低下し、主弁に作用する力が釣り合い($P_s A_s + P_c A_r = P_c A_c$)、主弁が開き始める。

パイロット流量 Q_p とフィードバック流路流量 Q_c が等しくなる主弁位置で主弁に作用する力が釣り合うので、パイロット弁開度に応じて($Q_p = Q_c$)となる位置に主弁は位置制御される。すなわち、小流量のパイロット流量 Q_p を制御することにより、それに比例した大流量の主弁流量 Q_r を得ることができ、一種の流量増幅器として機能する。

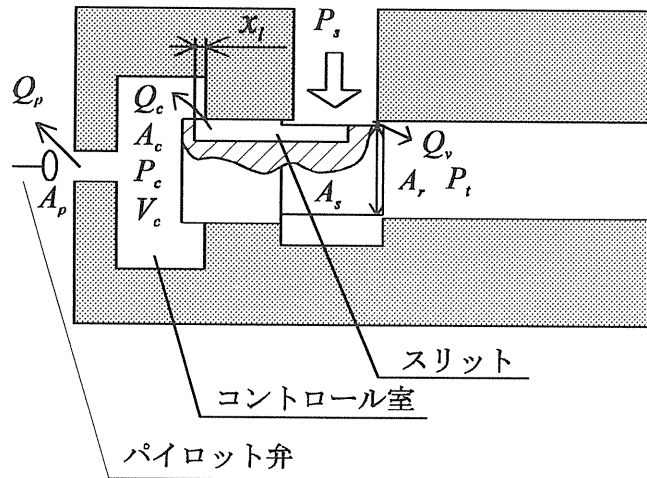


図8-1 比例シート弁

比例シート弁の特性を表す基礎式を以下に導く。

a)パイロット弁流量 Q_p

$$Q_p = C_{dp} A_p \sqrt{\frac{2(P_c - P_r)}{\rho}} \quad (8-1)$$

b)フィードバック流路流量 Q_c

$$Q_c = C_{dc} W_c (x + x_l) \sqrt{\frac{2(P_s - P_t)}{\rho}} \quad (8-2)$$

c)主弁流量 Q_r

$$Q_r = C_{ds} W_m x \sqrt{\frac{2(P_s - P_r)}{\rho}} \quad (8-3)$$

ただし、 $W_m = \pi D_s$

d)コントロール室に関する連続の式

$$Q_c + A_c \dot{x} - Q_p = \frac{V_c}{\beta_e} \dot{P}_c \quad (8-4)$$

e)主弁運動方程式

$$m_s \ddot{x} + b_x \dot{x} + k_f x = P_s A_s + P_r A_r - P_c A_c \quad (8-5)$$

左辺第3項は主弁に作用する定常流体力を表し、次式で与えられる。非定常流体力は無視する。

$$k_f x = \rho Q_r \cdot \frac{Q_r}{C_{ds} W_m x} = 2C_{dr} W_m x (P_s - P_r) \quad (8-6)$$

k_f を定常流体力係数として

$$k_f = 2C_{dr}W_m(P_s - P_r) \quad (8-7)$$

f)主弁の受圧面積関係

$$A_s + A_r = A_c \quad (8-8)$$

本研究では定常流体力の影響を流体力と等価なばね定数 k_f で表し、静特性解析は $k_f=0$ として扱う。

理論静特性は以下の式により導かれる。

(8-4) 式より、主弁が閉じた噴射前の定常状態では、次式が成り立つ。

$$Q_c = Q_p \quad (8-9)$$

主弁が閉じている状態 ($x=0$) では、

$$A_c P_c > A_s P_s + A_r P_r \quad (8-10)$$

このとき、燃料噴射前なので P_r は大気圧とできる。

主弁は $A_c P_c - A_s P_s - A_r P_r$ の力で弁座に押し付けられている。

P_c の低下に伴い (8-11) 式が成り立つと、主弁を弁座に押し付ける力がなくなり、主弁は動き始める。

$$A_c P_c = A_s P_s + A_r P_r \quad (x=0) \quad (8-11)$$

主弁が開いている状態 ($x>0$) では、主弁に作用する力は釣り合っているので (8-11) 式が成り立つ。

パイロット弁を閉じると、 P_c は増大し (8-10) 式の状態になり主弁は閉じる。この作動原理を燃料噴射弁に適用した場合の構造図を図8-2に示す。しかし、この構造では、主弁の開動作により、サック部圧力が供給圧力に近くなり主弁を閉じる妨げになる。この問題を解決するため、主弁-サック間の燃料流路に中間絞りを設け、サック部圧力を供給圧力よりも10~20%下げて弁閉力を発生させる機構を採用した。図8-3に中間絞り付き燃料噴射弁の構造を示す。噴射弁の作動原理は基本的には比例シート弁と同じである。比例シート弁と異なる点は、絞りがあるため実際の噴射圧力が供給圧力より低くなるということである。

上流絞りで供給圧力を αP_s (例: $0.8P_s$) に減圧するとして、主弁開時の流量関係より

$$A_u \sqrt{(1-\alpha)} = A_d \sqrt{\alpha} \quad (8-12)$$

ただし、上流絞りと噴射孔における流量係数、軽油密度は等しいと仮定する。

(8-12) 式より

$$A_u = A_d \sqrt{\alpha/(1-\alpha)} \quad (8-13)$$

環状絞り直径を d_u 、半径隙間を d とすれば、

$$\delta \approx A_u / \pi d_u \quad (8-14)$$

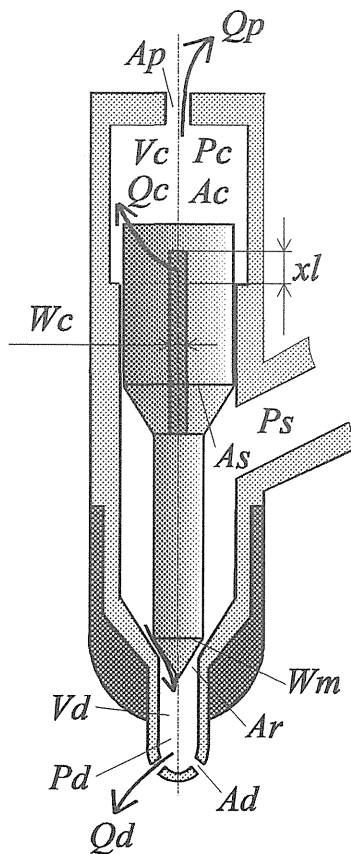


図8-2 位置フィードバック機構を取り入れた可変リフト燃料噴射弁

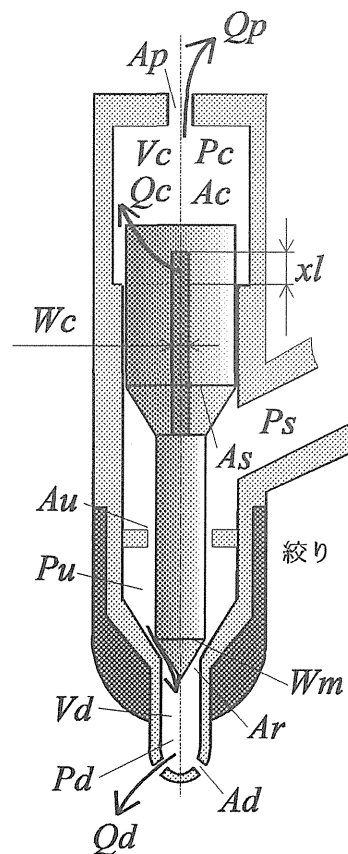


図8-4 中間絞り付き燃料噴射弁

- 例:
- $\alpha=0.9, A_d=1.57 \times 10^{-7} \text{m}^2$ ($\phi 0.2 \times 5 \text{place}$), $d_u=4 \times 10^{-3} \text{m}$ ($\phi 4$),
 $\rightarrow d=37 \text{mm}$
 - $\alpha=0.8, A_d=1.57 \times 10^{-7} \text{m}^2$ ($\phi 0.2 \times 5 \text{place}$), $d_u=4 \times 10^{-3} \text{m}$ ($\phi 4$),
 $\rightarrow d=25 \text{mm}$
 - $\alpha=0.7, A_d=1.57 \times 10^{-7} \text{m}^2$ ($\phi 0.2 \times 5 \text{place}$), $d_u=4 \times 10^{-3} \text{m}$ ($\phi 4$),
 $\rightarrow d=19 \text{mm}$

主弁が開くためには、パイロット弁開口面積、フィードバックスロット寸法等諸元は次式を満たす必要がある。

$$\frac{A_p}{W_c} \sqrt{\frac{\kappa}{1-\kappa}} - x_l > 0 \quad (8-15)$$

ここで κ は主弁面積比 $\kappa=(A_s+A_u)/A_c$

上流環状絞りの付加により、主弁運動方程式は以下のようなになる。

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + k_f x = A_s P_s + A_{ru} P_u + A_{rd} P_d - A_c P_c \quad (8-16)$$

ここで、 $A_s + A_{ru} + A_{rd} = A_c$ 、 $P_s > P_u > P_d$ であるから、パイロット弁閉弁によりコントロール室圧力が供給圧力に回復した際、弁戻し力が発生する。

定常状態において

$$A_s P_s + A_{ru} P_u + A_{rd} P_d = A_c P_c \quad (8-17)$$

ここで、主弁開度が十分であり $P_d = P_u$ であると仮定すると、パイロット弁-フィードバックスロットの流量関係式

$$A_p \sqrt{P_s} = W_c (x + x_l) \sqrt{P_s - P_c} \quad (8-18)$$

より、

$$x = \frac{A_p}{W_c} \sqrt{\frac{A_c}{A_c - (A_s + \alpha(A_{ru} + A_{rd}))}} - x_l \quad (8-19)$$

8-3 燃料噴射弁の諸元とシミュレーションによる動特性評価

主弁最大リフト量が大きすぎると応答おくれ時間が長くなるため、最大リフト量を(8-19)式をもとに0.2mm程度に設定する。その際、選定されたパラメータ W_c 、 x_l は(8-15)式を満たしている必要がある。

各パラメータを(8-15)式、(8-19)式をもとに

モデル1

$$A_p = 1.57 \times 10^{-7} \text{m}^2 \quad (\phi 0.5 \times 0.1 \text{mm リフト})$$

$$W_c = 0.8 \times 10^{-3} \text{m} \quad (0.4 \text{mm } 2\text{place})$$

$$x_l = 0.5 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$\text{主弁径: } \phi 6 \quad \text{ステム径 } \phi 4 \quad \text{シート径 } \phi 2$$

$$\alpha = 0.8 \quad \delta = 25 \mu\text{m}$$

$$(8-19) \text{式による 主弁最大リフト } 0.25 \text{mm}$$

モデル2

$$W_c = 0.6 \times 10^{-3} \text{m} \quad (0.3 \text{mm } 2\text{place})$$

$$x_l = 0.5 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$\alpha = 0.7 \quad \delta = 17 \mu\text{m}$$

他、モデル1と共通

$$(8-19) \text{式による 主弁最大リフト } 0.22 \text{mm}$$

と設定し、ボンドグラフを用いた動特性シミュレーションを行った。なお、シミュレーションには(社)日本油空圧学会より公開されているボンドグラフ・シミュレーション・プログラムBGS Pを使用した。

8-4 ボンドグラフを用いた燃料噴射弁の動特性シミュレーション

図8-4に中間絞り付き燃料噴射弁のボンドグラフを示す。シミュレーションでは、パイロット弁（超磁歪素子駆動電磁弁）のステップ状開口に対する副弁の応答を調べた。モデル1の燃料噴射弁のシミュレーションに用いるパラメータを表8-1に示す。

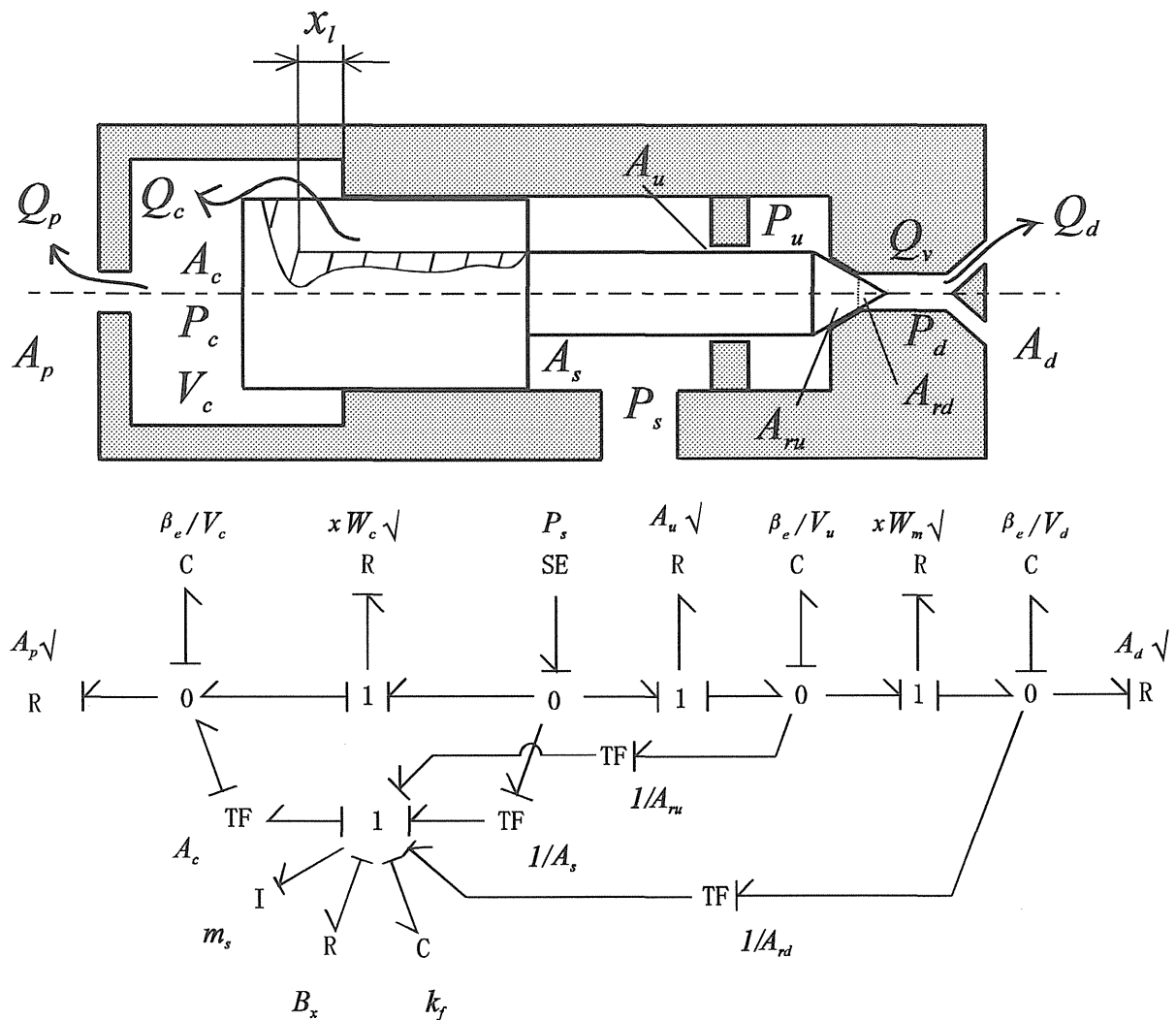


図8-4 中間絞り付き燃料噴射弁のボンドグラフ

表 8-1 モデル1の動特性シミュレーションに用いるパラメータ

コントロール室側受圧面積 (P_c 側)	A_c	$2.827 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
噴射孔面積	A_d	$1.57 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
パイロット弁開口面積	A_p	$1.57 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
サック側受圧面積 (P_d 側)	A_{rd}	$3.142 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
絞り後圧力受圧面積 (P_u 側)	A_{ru}	$9.425 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
主弁受圧面積 (P_d 側)	A_{rd}	$3.142 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
供給圧受圧面積 (P_s 側)	A_s	$1.571 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
弁体しゅう動部の粘性抵抗係数	b	50
流量係数 (スリット)	C_{dc}	0.7
流量係数 (主弁)	C_{dd}	0.7
流量係数 (パイロット弁)	C_{dp}	0.7
流量係数 (噴孔)	C_{ds}	0.3
ニードルのコントロール室側直径	D_c	6 mm
サック直径	D_d	2 mm
作動流体の体積弾性係数	K	1.0×10^9
弁体質量	m	0.01 Kg
供給圧力	P_s	100 MPa
コントロール室容積	V_c	$1.51 \times 10^{-7} \text{ m}^3$
サック容積	V_d	$3.14 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
フィードバックスロット幅	W_c	0.8 mm(0.4mm×2)
弁座の周長	W_m	$6.28 \times 10^{-3} \text{ m}$
フィードバックスロット幅のアンダーラップ長さ	x_l	0.5 mm
作動流体 (軽油) の密度	ρ	840 Kg/m^3
絞りによる減圧割合	α	0.8

図 8-5 にモデル1のシミュレーション結果を示す。パイロットステップ入力に対して 0.15MS で主弁が動き出している。その後速やかに主弁が動きリフト量が 0.1MM 付近から力がバランスしだし、そこから主弁は比較的緩やかな変位速度で整定している。図より、パイロット弁が閉じられるとすぐに主弁のも速やかに閉じることがわかる。

モデル2の燃料噴射弁のシミュレーションに用いるパラメータを表 8-2 に示す。なお、表 8-2 に記載されていないパラメータはモデル1と同じ値を用いている。

表 8-2 モデル 2 の動特性シミュレーションに用いるパラメータ

コントロール室側受圧面積 (P_c 側)	A_c	$2.827 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
サック側受圧面積 (P_d 側)	A_{rd}	$3.142 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
絞り後圧力受圧面積 (P_u 側)	A_{ru}	$9.425 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
供給圧受圧面積 (P_s 側)	A_s	$1.571 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
ニードルのコントロール室側直径	D_c	6 mm
サック直径	D_d	2 mm
フィードバックスロット幅	W_c	0.6 mm(0.3mm×2)
フィードバックスロット幅のアンダーラップ長さ	x_l	0.5 mm
絞りによる減圧割合	α	0.7

図 8-6 にモデル 2 のシミュレーション結果を示す。モデル 1 と同様に、パイロットステップ入力に対して良い反応を示すことがわかる。パイロット弁が閉じると 0.2ms 以下で主弁が閉弁している。なお、どちらも主弁開き初期(微小弁開度)のシート部圧力損失により、噴射圧力が上流絞りで設定した圧力に上昇する途中で主弁に作用する力がバランスするため、最大弁リフト量は設定値よりも小さくなる。

このときの噴射量は、パイロット弁を 1ms 開く信号に対して、0.044cc である。。

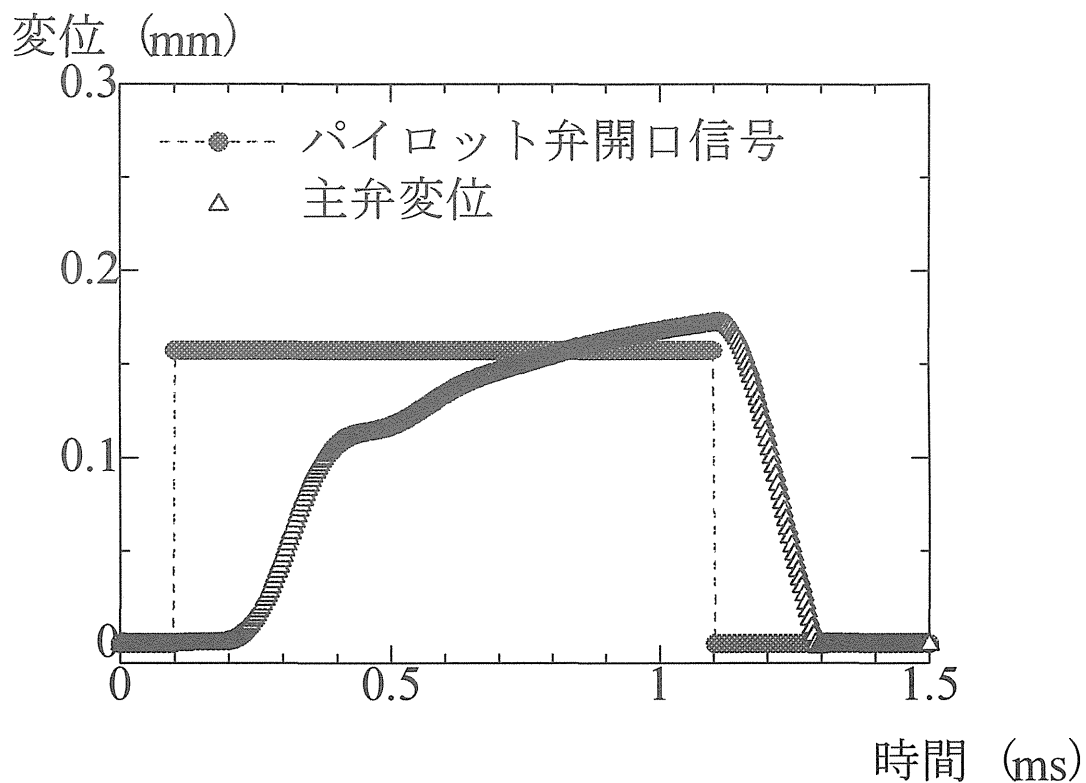


図 8-5 モデル1の動特性シミュレーション結果

コントロール室側受圧面積 (P_c 側)	A_c	$2.827 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
サック側受圧面積 (P_d 側)	A_{rd}	$3.142 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
絞り後圧力受圧面積 (P_u 側)	A_{ru}	$9.425 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
供給圧受圧面積 (P_s 側)	A_s	$1.571 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
ニードルのコントロール室側直径	D_c	6 mm
サック直径	D_d	2 mm
フィードバックスロット幅	W_c	0.4 mm
フィードバックスロット幅のアンダーラップ長さ	x_l	0.5 mm
絞りによる減圧割合	α	0.8
供給圧力 (P_s)	P_s	100 MPa

変位 (mm)

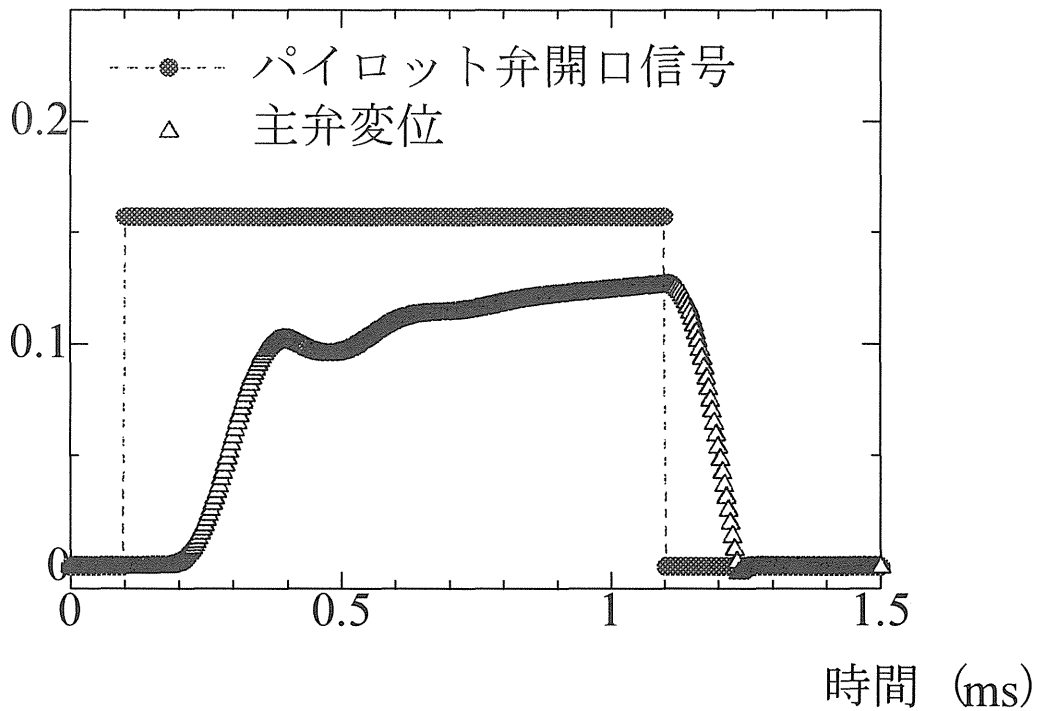


図8-6 モデル2の動特性シミュレーション結果

コントロール室側受圧面積 (P_c 側)	A_c	$2.827 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
サック側受圧面積 (P_d 側)	A_{rd}	$3.142 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
絞り後圧力受圧面積 (P_u 側)	A_{ru}	$9.425 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
供給圧受圧面積 (P_s 側)	A_s	$1.571 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
ニードルのコントロール室側直径	D_c	6 mm
サック直径	D_d	2 mm
フィードバックスロット幅	W_c	0.6 mm
フィードバックスロット幅のアンダーラップ長さ	x_l	0.5 mm
絞りによる減圧割合	α	0.7
供給圧力 (P_s)	P_s	100 MPa

第9章 結言

本研究では、最大変位 $35\mu\text{m}$ 程度の超磁歪素子とパスカルの原理に基づいた流体式変位増幅機構とを組み合わせることにより、超磁歪アクチュエータ単体ではカバーできない可動範囲 $0.1\text{mm}\sim 0.5\text{mm}$ の領域を対象とした高速直動アクチュエータの開発をおこなった。さらに、環境問題を見すえたディーゼルエンジン排気ガス性状の改善を目的に、超磁歪アクチュエータにより駆動する高速高圧燃料噴射弁の開発構想と基本設計を示した。本研究の経緯と成果は以下の通りである。

- (1) 2種類の流体式変位増幅機構を製作し、変位増幅特性、剛性、超磁歪素子との適合性、取り扱いの簡便性などを評価した。流体式変位増幅機構の一つは、大ピストンの微小直動運動をシリンダ内に封入した流体を介して、小ピストンに伝達する方式であり、封入流体の圧力調整により超磁歪素子に加えるプレストレスを容易に設定できる、機構の剛性が高いなどの特徴を持つが、ピストンしゅう動部からの流体のリークが無視できず、しゅう動部のシールと流体の補給方法が重要である。このピストン式変位増幅機構の理論増幅率は25であるが、実際の増幅率は10程度の小さいものとなった。これは、流体の気泡含有による体積弾性係数の低下、しゅう動部からの封入流体のリーク、内圧増加によるチェック弁での逆流が原因と考えられる。もう一つの流体式変位増幅機構は、大小のピストンを有効断面積の異なる大小の金属ベローズに置き換えたものである。ゼロリークで取り扱いが簡単であり、機構を簡素化できるが、外力に対しては、変位増幅に寄与しないベローズ軸方向以外の体積変化を生じるため、剛性が低いという問題点がある。しかしながら、封入流体を完全に密封することにより、ピストン式に比べて大きな増幅率が得られ、また、しゅう動部を持たないので摩擦力の影響を受けないなど、低負荷用としては検討の余地がある。両者の機構に共通する事項として、封入する流体中の気泡除去が重要であることもわかった。この2種類の機構の特性試験の結果、超磁歪アクチュエータ用の変位増幅機構には、剛性が高く、流体制御弁用途に利用する場合は流体の補給も得やすいなどの特徴を持つ、ピストン式が適していると判断し、超磁歪高速電磁弁を設計製作した。
- (2) ピストン式流体増幅機構を搭載した超磁歪アクチュエータを設計製作において、ソレノイドの励磁電圧波形にはFEMを用いた非定常磁場解析を適用して最適化をはかった。超磁歪素子には、直径 10mm × 長さ 78mm の超磁歪素子丸棒と、これと同サイズで、さらに大きな歪み率を得る目的で 1.5mm 厚にスライスした Sm-Co 系永久磁石5枚と素子を交互に挟んだ磁気バイアス型の2種類を製作し、磁歪特性の比較を行った。特性試験の結果、後者の磁気バイアス型は、超磁歪素子単位長さ当たりの磁歪は前者の素子に比べて10%大きい、寸法変化に寄与しない永久磁石を含

む分、全長の寸法変化としては、両者はほぼ同じであることがわかった。そこで、生産性、コストの観点から前者の超磁歪素子を選定し、この超磁歪アクチュエータとシート径 6mm×ストローク 0.25mm のポペット弁を結合した高速電磁弁を製作して、そのパルス流体制御特性を調査した。この種の弁は電磁氣的、機械的作動遅れのために、通常 50~100Hz 程度の搬送波周波数による PWM 流体制御が行われるが、今回、ソレノイド励磁方法の最適化と超磁歪アクチュエータによる高速な弁体の駆動により、搬送波周波数 300Hz における PWM 流体制御に実現するとともに、パルス流体制御に起因する圧力脈動の低減に成功した。

- (3) 超磁歪アクチュエータをパイロット弁に用いて主弁のリフト量を高速に制御するディーゼル燃料噴射弁の開発構想と基本設計を示した。また、基本設計した弁構造の作動は、ボンドグラフを用いた動特性シミュレーションにより確認した。本研究で提案する燃料噴射弁の構造は、パイロット弁の開弁動作に応じて、流体式の高剛性な位置フィードバック機構により、高速に主弁リフト量が制御できるので、超磁歪素子の高速応答性を十分発揮できる応用例と考えられる。今後は噴射率制御、噴射時期制御等のエンジン運転状態に応じた電子制御を目的とした、実用化に向けた設計への発展が望まれる。

謝辞

本研究遂行にあたって、実験データの収集、超磁歪アクチュエータおよび変位増幅機構の製作に協力を得た横浜国立大学工学部学生 角 寛郎 君、西山友貴君に感謝する。

参考文献

- (1)日本機会工業連合会, 先端加工機械技術振興協会, 平成2年度超磁歪デバイスの適用に関する調査研究(1993), 66.
- (2)金子, 未踏加工技術, 1986-5(1986), 2.
- (3)Clark, A.E., Teter, J.P., McMasters, O.D., Magnetstriction "Jumps" in Twinned $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$, J. Appl. Phys. 63-8(1988), 3910.
- (4)Jenner, A.G., Load, D.G., Faunce, C.A., Magnetoelastic properties of terbium-dysprosium-iron compounds, J. Appl. Phys. 69-8(1991), 5780.
- (5)江田, 最先端のアクチュエータ:超磁歪アクチュエータ, センサ技術 Vol.10, No.8 (1990), 74.
- (6)Richl, H., Trends bei der Entwicklung von Hydraulic-Ventilmagneten, Ölhydraulic und Pneumatic, 35-10(1991), 776.
- (7)樋口, 圧電アクチュエータ, 機械の研究, Vol.44, No.1(1992), 99.
- (8)横田, 平本, 積層 PZT 素子を用いた高速電気油圧サーボ弁 (ソフトウェアによるヒステリシス補償), 日本機械学会論文集 57-533B(1991), 182.
- (9)大内, 他, 電わい素子 PMN を用いた高速電気-油圧サーボ弁, 油圧と空気圧, Vol.17-1(1986), 74
- (10)T. Urai, T. Sugiyama, Development of a direct drive servo valve using a giant magnetostrictive material, Proceedings of the 2nd JHPS International Symposium on Fluid Power, (1993), 131
- (11)Kvarnsjö, L., Engdahl, G., Examination of the interaction between eddy currents and magnetoelasticity in Terfenol-D, J. Appl. Phys. 69-8(1991), 5783.