
タンデム形超磁歪素子を用いたコモンレール用 超高圧電子インジェクタの研究

(課題番号 12650226)

平成12・13年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成14年3月

横浜国立大学附属図書館



11446330

研究代表者

田中 裕久 (横浜国立大学 大学院 工学研究院 教授)

は し が き

本研究は、ディーゼルエンジンの排気ガス中の窒素酸化物、排気黒煙および黒煙微粒子の低減を目的に、噴射率を電子信号に応じて自在に制御できる高速作動するコモンレール用電子インジェクタの開発に関するもので、連続可変噴射率制御と 0.3ms の高速噴射を実現するため、パイロット弁にタンデム形超磁歪アクチュエータ(GMA)を、主ニードル弁に流体位置フィードバック機構をもつ比例弁を開発したことにある。GMA は、直径 3.5mm、長さ 30mm の超磁歪素子 3 本を 1 セットとし、これを Z 形ホルダに 2 セット直列結合することにより、1 つのコイルで従来の 2 倍の歪を発生できるものとし、全長 40mm の GMA は 100kA/m の起磁力で 45 μ の変位を発生できるものとした。また、比例弁はフィードバックスロットをもつことにより、パイロット弁開度に比例する主弁開度を制御でき、かつ液圧支持することにより従来のばね支持に比べ、固有振動数を数 kHz と高いものとした。また、設計解析に専用のボンドグラフを作成し、主弁の応答性と安定性に及ぼす設計パラメータの最適化を容易に行えるようにした。これにより 4 L ディーゼルエンジン用として作製したノズル径 0.16mm 穴数 6 のノズルで、160MPa、30mm³/ms の噴射率を、0.3ms で発生できる電子インジェクタを開発できた。

研 究 組 織

研究代表者：田中裕久（横浜国立大学 大学院 工学研究院 教授）

研究分担者：佐藤恭一（横浜国立大学 大学院 工学研究院 助教授）

研究分担者：浦井隆宏（日本ムーグ（株）開発部 主任研究員）

交付決定額

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合 計
平成 1 2 年度	1,900	0	1,900
平成 1 3 年度	1,400	0	1,400
総 計	2,300	0	2,300

研究発表

（１）学会誌等

1. 田中裕久、佐藤恭一、浦井隆宏、タンデム形超磁歪素子を用いたコモンレール用比例インジェクタの開発、自動車技術会論文集、32 巻 2 号、2001 年 4 月、p.85-90.

（２）口頭発表

2. H.Tanaka, Y.Sato and T.Urai, Development of a Common-Rail Proportional Injector Controlled by a Tandem Arrayed Giant-Magnetostrictive-Actuator, ATT, SAE-2001-01-3182, Balcerona, Vol.2, 2001,Oct., p.11-15.

第1章 緒論 1	
1・1 研究の背景	2
1・2 従来の研究	4
1・2・1 超磁歪アクチュエータ	4
1・2・2 直動形サーボ弁	5
1・2・3 燃料噴射弁	5
1・3 本研究の目的と構成	6
参考文献	8
第2章 超磁歪材料及び超磁歪アクチュエータ	16
2・1 はじめに	18
2・2 磁歪効果	18
2・2・1 強磁性体と磁区	18
2・2・2 磁壁	19
2・2・3 磁気異方性	20
2・2・4 磁化過程	20
2・2・5 磁歪効果	21
2・3 超磁歪材料及び超磁歪アクチュエータについて	22
2・3・1 超磁歪材料	22
2・3・2 Terfenol-D	22
2・3・3 製造法	23
2・4 超磁歪材料の磁気、機械的特性	24
2・4・1 磁気特性	24
2・4・2 機械的特性	25
参考文献	27
第3章 タンデム形超磁歪アクチュエータの構造と特性	57
3・1 はじめに	58
3・2 ストローク増幅機構	59
3・3 タンデム形アクチュエータの構造	61
3・4 静特性と周波数特性	62
3・5 アクチュエータ強度特性	62
参考文献	63

第4章 タンデム形超磁歪アクチュエータの高速化	8 1
4・1 はじめに	8 3
4・2 静磁場解析	8 3
4・2・1 基本構成の解析	8 3
4・2・2 バイアス磁場	8 4
4・3 アクチュエータの高速化（動磁場解析）	8 6
4・3・1 アクチュエータの動的モデル	8 6
4・3・2 渦電流の影響（動磁場解析）	8 6
4・3・3 過励磁駆動法とコイル再設計	8 7
4・3・4 応答特性試験	8 7
参考文献	8 8
第5章 高速サーボ弁への適用とその性能	1 0 5
5・1 はじめに	1 0 6
5・2 直動型サーボ弁（ダイレクトドライブサーボ弁、DDV）	1 0 6
5・3 超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁構成	1 0 7
5・4 タンデム形超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁	1 1 0
参考文献	1 1 1
第6章 ディーゼルエンジンコモンレール用	
燃料噴射弁への適用とその性能	1 3 6
6・1 はじめに	1 3 9
6・2 燃料噴射弁の構造と作動原理	1 3 9
6・3 燃料噴射弁の性能試験	1 4 3
6・3・1 タンデム形超磁歪アクチュエータの	
静特性と過渡応答特性	1 4 3
6・3・2 噴射率の測定法と装置	1 4 3
6・3・3 燃料噴射弁の過渡応答特性（噴射率特性）	1 4 5
6・3・4 噴射率の可変制御	1 4 5
第7章 結論	1 6 7
謝辞	1 7 0

第 1 章

緒 論

1・1 研究の背景

位置決め機構として、これまで多くの制御用アクチュエータが開発され⁽¹⁻¹⁾、様々な分野で用いられ、発展してきた。しかも駆動機構だけでなく、センサー精度の向上、制御手法の高度化により、複雑な動きを精度良く、希望どおりにコントロールすることが可能になってきた。近年のコンピュータ制御システムの発展も、今後の研究開発活動の広がりにも貢献するものと思われる。しかし近年の制御システムには、高速駆動、高精度な微小位置決め、高い繰り返し精度、高出力化による小型化などの要求が高まっており、しかも信頼性の高さも重要なポイントとなっている。このような要求は、自動車・航空機等の輸送機械、工作機械、材料試験装置、産業用ロボット、電子部品製造装置、OA 機器、成形機などの工場製造設備等、アクチュエーション機構を用いるすべてのアプリケーションで求められている。

一般的に用いられるアクチュエータには、図 1-1 に示すように、油圧や空気圧によるリニアアクチュエータまたはロータリーアクチュエータが有る。特に油圧の場合は大きな発生力が得られることから、建設機械、成形機、圧延設備等の位置決め機構に多く用いられてきた。しかしその速度は遅く、送り精度も荒い。そこで図 1-2⁽¹⁻²⁾ に示すようなサーボ弁を用いたサーボ機構及び低摺動抵抗のアクチュエータとの組み合わせにより、10msec レベルの速度、10 μ m レベルの位置決め精度を達成し、材料試験装置、航空機等の高レベルの制御を要求される分野に用いられてきた。しかし構造的にどうしても大きくなること、及び近年の要求速度、位置決め精度に一桁から二桁開きがあるのが現状である。電動モータ（図 1-3 も、インバータなどの技術による省エネ化、速度・位置制御手法の確立などから、同じく良く用いられているが、高出力化には大型にならざるおえず、位置決め精度も油圧アクチュエータと同レベルで、より高速・高精度な精密機器の開発に、問題となっていた。

その高い要望に答える駆動機構として、ボイスコイルモーター、圧電材料などが注目されている。ボイスコイルモータは、磁場中のコイルに電流を流すことでコイルに力を発生させるという、いわゆるフレミングの法則によるアクチュエータで、身近なところではオーディオ用スピーカー、コンピュータ用ハードディスクのピックアップ駆動機構等に用いられているものである（図 1-4）⁽¹⁻³⁾。後者のアプリケーションに用いられていることからわかるように、その発生速度、位置決め精度は高いレベルに有り、一部では油圧の制御弁などにも用いられている⁽¹⁻⁴⁾。しかしその発生力は小さく、ダンピング特性も低いので制御に工夫が必要である。圧電材料は電圧をかけることでその寸法が変化する特性を持ち、その寸法変化を変位として用いるアクチュエータである（図 1-5）⁽¹⁻⁵⁾。寸法の変化速度は μ sec オーダーととても早い、変位に要する電圧が 10kV/cm ととても高く、駆動アンプが特殊となる。数百 V の低電圧での駆動を可能とするためには、材料厚さを薄くする必要があるが、有効な変位を取り出すには数百層に貼り合わせる必要が生じ、それによる接

着部及び各層に必要な電極部の耐環境性や信頼性が問題となる。またキュリー温度が 180℃程度と低く、高速駆動時の発熱での特性低下や、使用環境温度に限界が生じる。

その他にも、静電アクチュエータ、可動鉄片形リニアフォースモータ、水素吸蔵合金、形状記憶合金、超音波アクチュエータ、光圧電素子（図 1-6）⁽¹⁻⁶⁾ 等があるが、いずれも発生速度、変位(位置決め精度)、発生力、耐環境性、信頼性を同時に実現できるものではない。

これら要求仕様に対し、大きな可能性を持つアクチュエータとして、巨大な磁歪定数を持つ超磁歪材料によるアクチュエータがある⁽¹⁻⁷⁾。磁歪は磁性体が磁化したときにその外形が変形する現象で、磁歪現象は 18 世紀中頃に Joule によって発見されて以来、鉄 Fe、ニッケル Ni、コバルト Co などの強磁性体あるいはフェライトなどの酸化物磁性体を対象にした多くの研究が行われてきた。しかし、これらの磁歪材料の磁歪定数（飽和状態における歪量）は 40×10^{-6} 程度と小さく、かつ大きな磁界を必要とするため、ごく限られた分野での応用にとどまっていた。ところが 1960 年代から米国を中心に行われた希土類磁性材料の研究により、テルビウム Tb やディスプロシウム Dy などと鉄との二元系合金が 1000×10^{-6} を超える巨大な磁歪定数を持つことが見出された。先に挙げた磁歪材料に比べて二桁も大きい磁歪定数であることから超磁歪材料と称されており、 $\text{Tb}_{0.27 \sim 0.3} \text{Dy}_{0.7 \sim 0.73} \text{Fe}_{1.9 \sim 2}$ の組成範囲のものが Terfenol-D (Ter ; Terbium, fe ; Iron, nol ; Naval Ordinance Laboratory, D ; Dysprosium) の名称で欧米のメーカー (Edge Technologies, Inc., Feredyn AB など) から製品化されている。また、焼結金属タイプの組成・成形法による、コスト的にも生産性の高い材料が、TDK 等にて製品開発が進んでいる。

表 1-1 に超磁歪材料の諸特性を圧電材料 (PZT) 及びニッケル (Ni) と比較したものを示す。市販されている超磁歪材料のロッドの最大寸法 (ロッド径、長さ) は、市販の PZT の 5~10 倍の長さにあたる。また、PZT の出力は 35MPa 程度と言われているのに対し、超磁歪材料の出力は 700MPa に及ぶことから、PZT に比べて大変位、大出力であるといえる。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、その高応答、高出力、非接触駆動可能、高温使用可能、高信頼性等の特長が、近年の微小位置決め制御用アクチュエータに要求される内容に合致するものと期待されている。

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ソリッドステートドライブに適する
- (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

1・2 従来の研究

1・2・1 超磁歪アクチュエータ

超磁歪材料は、低い駆動磁界で、高い磁歪特性が得られる。超磁歪材料の駆動磁界を発生するコイル、磁気回路を構成するヨーク、超磁歪材料にプレストレスを与えるばね等がアクチュエータとしての基本構成となり、単純な構成で、容易に変位を取り出す事が出来る (図 1-7)。例えば適切なプレストレス下において、40kA/m の磁界における磁歪を 1.0×10^{-3} とすれば、ロッド長 50mm に対して $50 \mu\text{m}$ の変位が取り出せる。伸縮の両変位を取り出すには、磁気回路中に永久磁石を設置してバイアス磁界をかけておくことであらかじめ超磁歪材料を歪ませておき、交流で駆動すれば良い。

超磁歪材料の応用は、アメリカ・フランス・スウェーデンで特に活発に行なわれている。アメリカは、本材料の開発元ということもあり、開発当初の応用目的であるソナー、音響トモグラフィなど、潜水艦や海洋監視などの軍事関係の機器への適用が進んでいる。フランス、スウェーデンも同様であるが、民需品への応用研究も盛んである。90 年代に入ると、日本での材料開発や応用研究結果が多く発表されてきている。現在以下に示すような分野での応用研究が進んでいる。

- ① 音響素子：振動子、歪駆動装置
- ② 光学制御素子：VTR、光スキャナ、光ヘッド、光学素子
- ③ センサー：磁気弾性表面波素子、圧力センサー、歪ゲージ
- ④ 機械制御素子：リニアモータ、回転モータ、ロボット、プリンタヘッド、制

御用サーボ弁、内燃機関用燃料噴射弁など

以上のように、さまざまな研究が報告されているが、実用化されたもの（市販されたもの）までには至っていないのが現状である。

1・2・2 直動形油圧サーボ弁

サーボシステムに対する高性能化への要求は、近年ますます高まっており、高流量、高応答、直動化を特長とする電気-油圧サーボ弁の開発が望まれている。その駆動部として、精密位置決め可能で、高応答、高出力の直動型リニアモーションアクチュエータの開発、実用化が進んでいる。前述のボイスコイルモータ（VCM）、可動鉄片型リニアフォースモータ（LFM）⁽¹⁻⁸⁾、圧電材料等での研究開発が主要なものである。

VCM は、油圧サーボ弁への製品への応用も進んでいる（図 1-8）。その高速性から、高応答な直動形サーボ弁が可能となっているが、発生力が小さいため、摺動抵抗や流体力などの外乱に弱く、ダンピング特性も悪いことから、制御に工夫が必要となる。LFM も実際の製品に使用されてきている（図 1-9）。磁石を内蔵したリニアアクチュエータなため、その出力は大きく、安定性に優れている。しかし可動鉄心の構造であるため、応答性が若干劣る。圧電材料は応答性、出力は良いが、前述の通り耐環境性・高信頼性に問題があり、対策として密閉構造が必要で、数百 V の高駆動電圧が必要である。以上のような特性から、いずれの場合も、高速な油圧サーボ弁への適用には限界があるのが現状である。

1・2・3 燃料噴射弁

現在、温暖化や大気汚染など地球的規模の環境問題への関心がとても高まっている。その中でも地球温暖化に対する対策が急務とされ、全地球的規模での対応を迫られている。自動車関連に対する規制も厳しくなり、排気ガス特性向上に対する技術開発が必須である。その中で、ガソリンエンジンよりも CO₂ の排出量の少なく、燃焼効率の良いディーゼルエンジンが見直され始めている。しかし、ディーゼルエンジンの排出する NO_x や特に粒子状物質（PM）は目で容易に確認できるため、市街地や道路沿道で深刻な環境問題となっており、ディーゼルエンジンに対しては強い拒否反応が出ているのが現状である。そのため、NO_x や PM の低減がディーゼルエンジンの急務とされている。ディーゼルエンジンの排気ガスの改善には燃料噴射系、吸気系、燃焼系において様々な試みがなされているが、燃料噴射系においては PM の低減に効果のある燃料噴射の高圧化やエンジン回転数に依存しない噴射圧力の最適制御、NO_x の低減のための燃料噴射率の制御、噴射時期の制御などの方法があり、これこれらの課題を克服する燃料噴射弁（インジェクタ）の開発が待たれている。

噴射の自由度が高いコモンレール式の高圧燃料噴射システムは、エンジン回転数に依存せずに低速から高圧噴射が可能であること、噴射圧力と噴射時期が独立に制御できること、

分割噴射（パイロット噴射）も容易であることなどが低排ガス化に適すると考えられている。従来、コモンレールシステムでは、小形オンオフ電磁弁をパイロット弁とする２段階燃料噴射弁が用いられている⁽¹⁻⁹⁾⁽¹⁻¹⁰⁾⁽¹⁻¹¹⁾。この種の噴射弁では、パイロット弁のオンオフの開閉に対応して、噴射率の応答の形状は矩形波状となるが、初期噴射量の急峻な立ち上がりはNO_x増大の原因となるため、実用的にはニードル弁とパイロット弁の間の油圧回路にオリフィスを設けて噴射開始時のニードル弁応答の立ち上がりを緩慢にし、初期噴射量を低減するなどの対策が施されている。しかしながら、固定絞りのオリフィスでは、多様なエンジン回転数や負荷状態の変化にあわせて噴射率形状の最適化を図ることは困難であり、一連の噴射率形状を電氣的に可変に制御できる特性が必要とされている。この問題に対し、流体式位置フィードバック機構を適用したニードル弁のリフト量制御が可能なパイロット弁比例制御形燃料噴射弁が開発されている（図 1-10）⁽¹⁻¹²⁾。この燃料噴射弁の機能を十分に引き出すためには、目標となる最適な噴射率形状に対して、パイロット弁開度を高速に制御できる小形リニアアクチュエータが必要となるが、比例ソレノイドなどの従来形リニアアクチュエータでは、応答性、発生力、小形さの面で十分な性能を持つものがないのが現状である。

1・3 本研究の目的と構成

本研究は、超磁歪アクチュエータの小型化、高座屈強度化及び低温度ドリフト化を図ることを目的にタンデム形超磁歪アクチュエータの開発と流体制御への応用に関するものである。超磁歪アクチュエータの基本的な課題には、

- ① アクチュエータとしての変位として、全長の高々0.1～0.15%程度が限界である為、全長が長くなる
- ② 圧縮荷重には非常に強いが引張り・曲げに弱い。
- ③ 温度膨張も変位と同じレベルで生じる可能性が有るため、位置決め精度に影響を与える可能性がある

があるので、上記 3 項目を解決し、小型で高応答、位置決め制御性に優れ、耐環境性・信頼性の高いアクチュエータ開発を目指すとともに、直動形高速サーボ弁及びディーゼルエンジン用燃料噴射弁（インジェクター）に応用し、その実用性を調べることを目的とする。

本論文は 7 章より構成される。

第 1 章（緒論）は、本研究の背景と目的を論じ、超磁歪アクチュエータの設計に関する

研究課題を示す。

第 2 章は、超磁歪材料及びアクチュエータの基本特性、性能を論じ、特にその磁気特性、機械的強度特性を示す。

第 3 章は、本研究の主要目的であるタンデム形超磁歪アクチュエータの基本構造とその特性に関し論じ、小型化の手法とその効果、振動環境下でも堅牢な設計手法、温度ドリフト対策とその効果に関し、設計内容、特性結果を示す。

第 4 章は、開発したタンデム形超磁歪アクチュエータの高速化に関し、渦電流の影響を有限要素法による磁場解析から明らかにし、改善策としての過励磁駆動法及びソレノイド再設計内容について論じる。解析に当たっては、アクチュエータの動的モデルを構築し、改善策の効果を周波数応答特性及びステップ応答特性から確認した結果を示す。

第 5 章は、本研究で開発したタンデム形超磁歪アクチュエータを、直動形油圧サーボ弁に適用した内容に関し論じる。サーボ弁構造及び特性に関し示し、本開発アクチュエータの有効性を示す。

第 6 章は、同じく本アクチュエータを、ディーゼルエンジンコモンレール用の燃料噴射弁のパイロット弁駆動部に適用した内容を論じる。パイロット弁の開度に応じて燃料噴射率を制御できるコモンレール用比例制御形電子燃料噴射弁が開発でき、試作燃料噴射弁では、パルス幅変調した噴射指令信号で駆動することにより、パイロット弁にこれまでオンオフ弁を用いたコモンレール用電子燃料噴射弁では困難であった噴射率形状の連続可変制御が可能であることを示す。

第 7 章は、各章で得られた主な結果をまとめて示す。

第 1 章参考文献

- (1-1) 宮人, アクチュエータ実用事典, フジテクノシステム (1988), 8-12
- (1-2) 油空圧技術便覧編集委員会, 油空圧技術便覧, 日刊工業新聞社 (1967), 403-406
- (1-3) 中田, 河瀬, 高林, 有限要素法によるボイスコイルモータの過渡応答磁界解析, 電気学会論文集 B, 105-5(1985), 483-488
- (1-4) 桑野, 松下, オブザーバによる直動型サーボ弁の高性能化, 油圧と空気圧, 15-2 (1984), 18-25
- (1-5) 内野, 圧電アクチュエータの制御技術, 機械設計, 34-27 (1990), 41-46
- (1-6) 光圧電性機能セラミックスとその光アクチュエータ系への応用, 日本油空圧学会論文集, 30-7 (1999), 522-526
- (1-7) A.E.クラーク, 江田, 超磁歪材料, 日刊工業新聞 (1995), 85-94
- (1-8) Teutsch,H., Electromagnetischer Linearmotor für direkt betätigte Servoventile, O+P,34-11(1990),754-761
- (1-9) Osuka.I., 他 3 名, SAE paper 940586(1994)
- (1-10) 宇野, 他 4 名, いすゞ技報, No.99(1988),29-35
- (1-11) 加藤, 他 3 名, 三菱自動車テクニカルレビュー, No.11(1999),16-24
- (1-12) 佐藤, 田中, 伏屋, コモンレール用比例制御形電子燃料噴射弁の特性に関する研究 (第 1 報), 日本機械学会論文集 C, 66-646(2000), 1857-1860

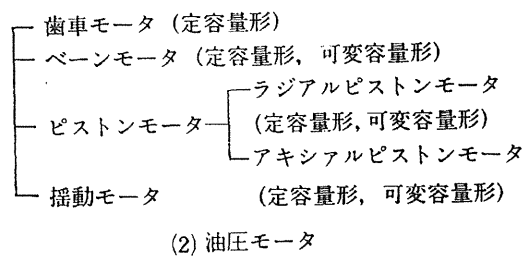
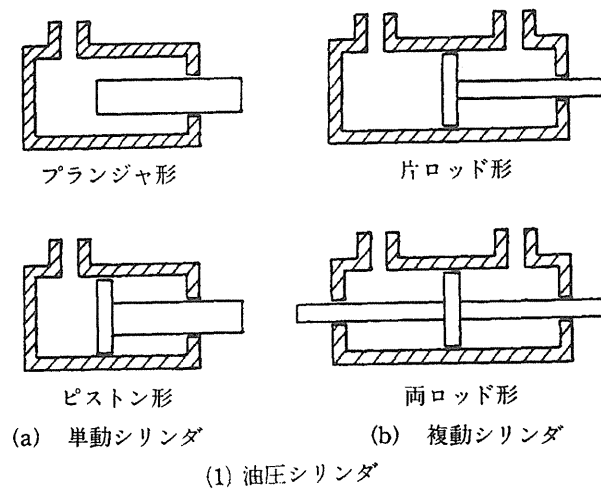


図 1-1 油圧アクチュエータの分類

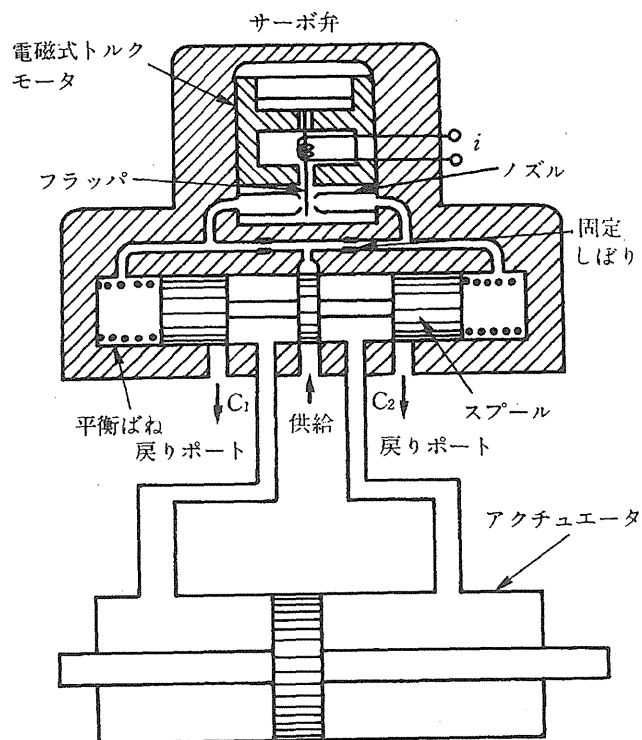


図 1-2 油圧サーボアクチュエータの一例

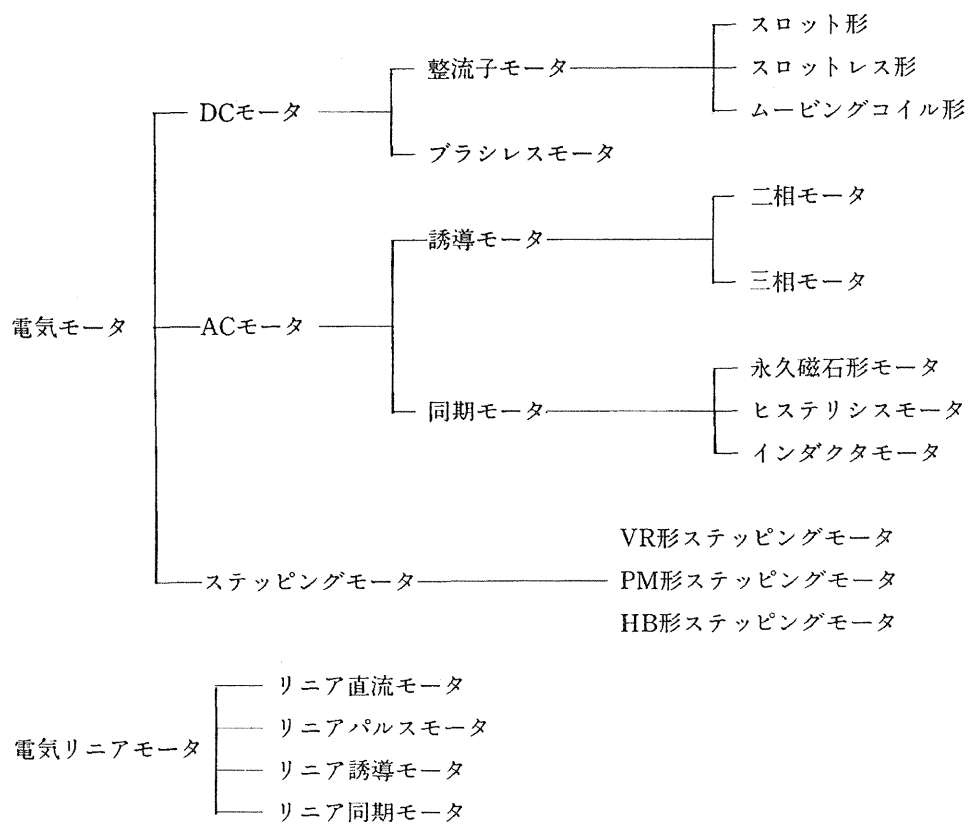


図 1-3 電気アクチュエータの分類

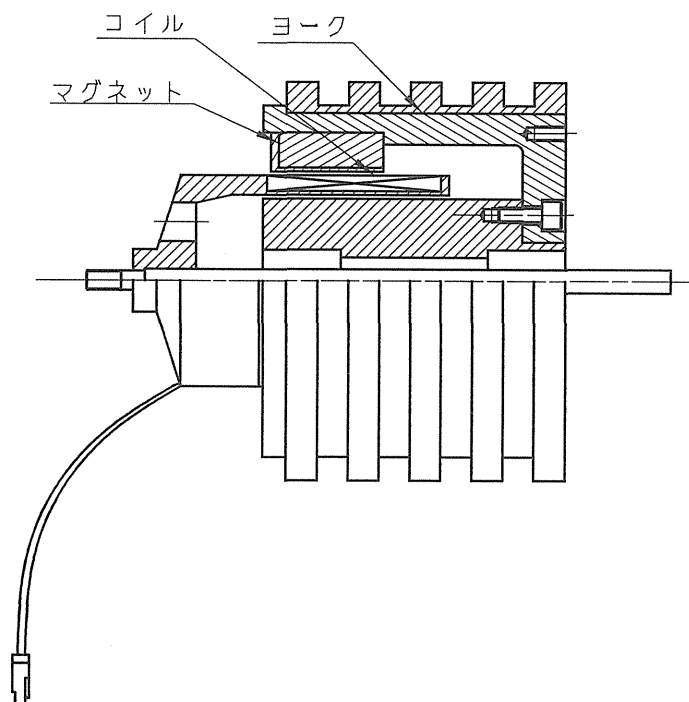


図 1-4 ボイスコイルモータ

表 1-1 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 GPa	25～35	73	320
引張応力 MPa	28	76	300
圧縮応力 MPa	700		
熱 的			
熱膨張率 1/°C	12×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶	13.3×10 ⁻⁶
電氣的			
電気抵抗 μΩcm	60		700
磁氣的			
磁 化 T	1.0		0.485
キュリー温度 °C	380	300	354
磁 歪			
磁 歪 ppm	1500～2500	100	
エネルギー密度 J/m ³	14000～25000	1300	－40
磁気機械的			
結合係数	0.7～0.75	0.65	0.3
音 速 m/s	1720		4900

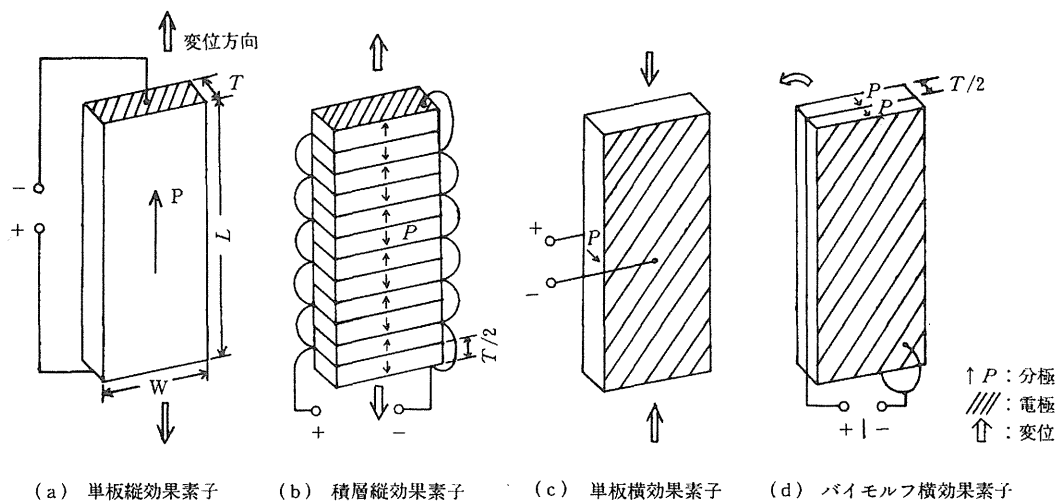


図 1-5 圧電アクチュエータ

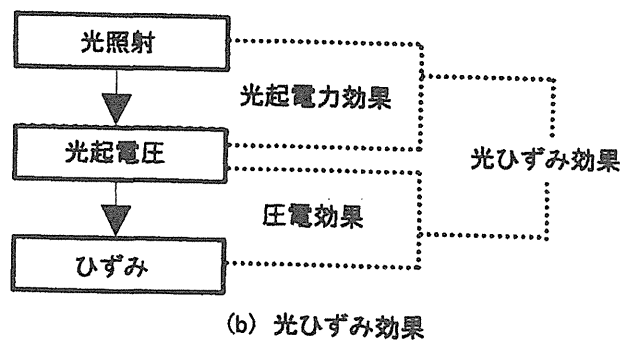
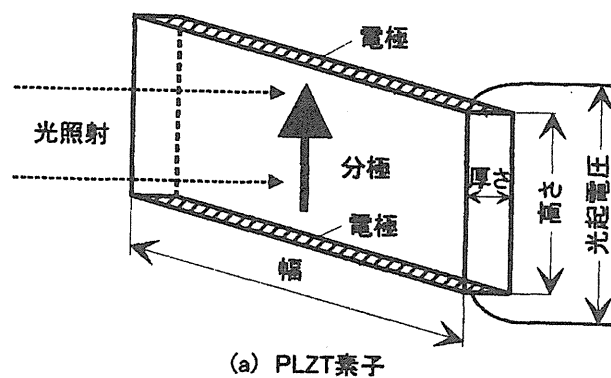


図 1-6 PLZT 素子と光ひずみ効果

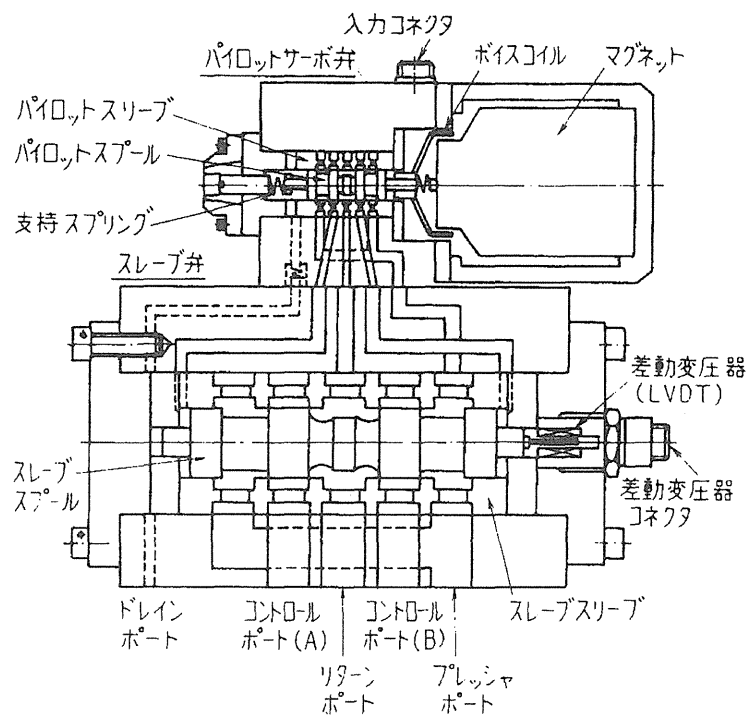


図 1-7 ボイスコイルモータによる直動形サーボ弁

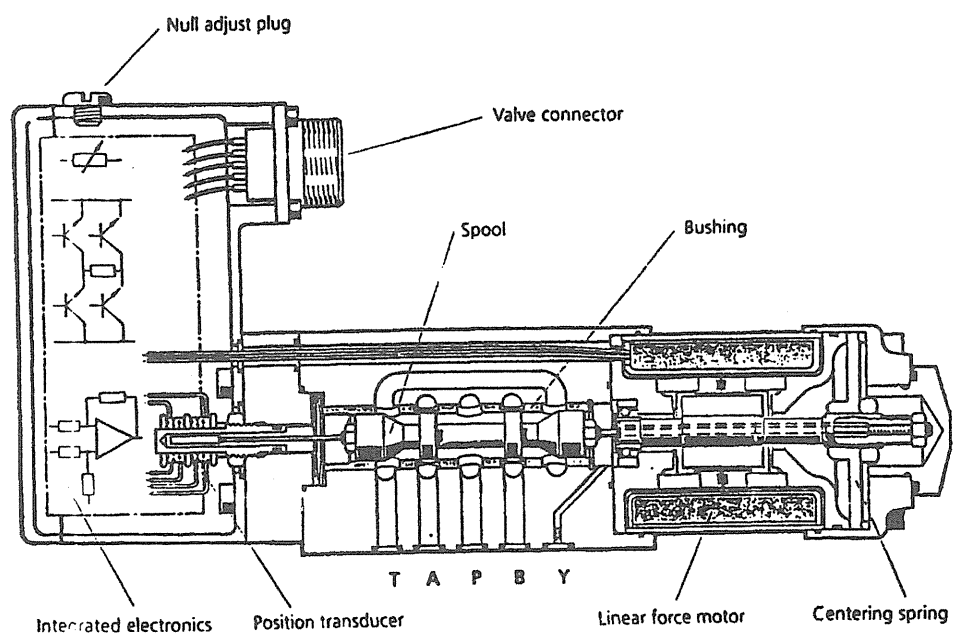


図 1-8 リニアモータ駆動アンプー一体型直動サーボ弁

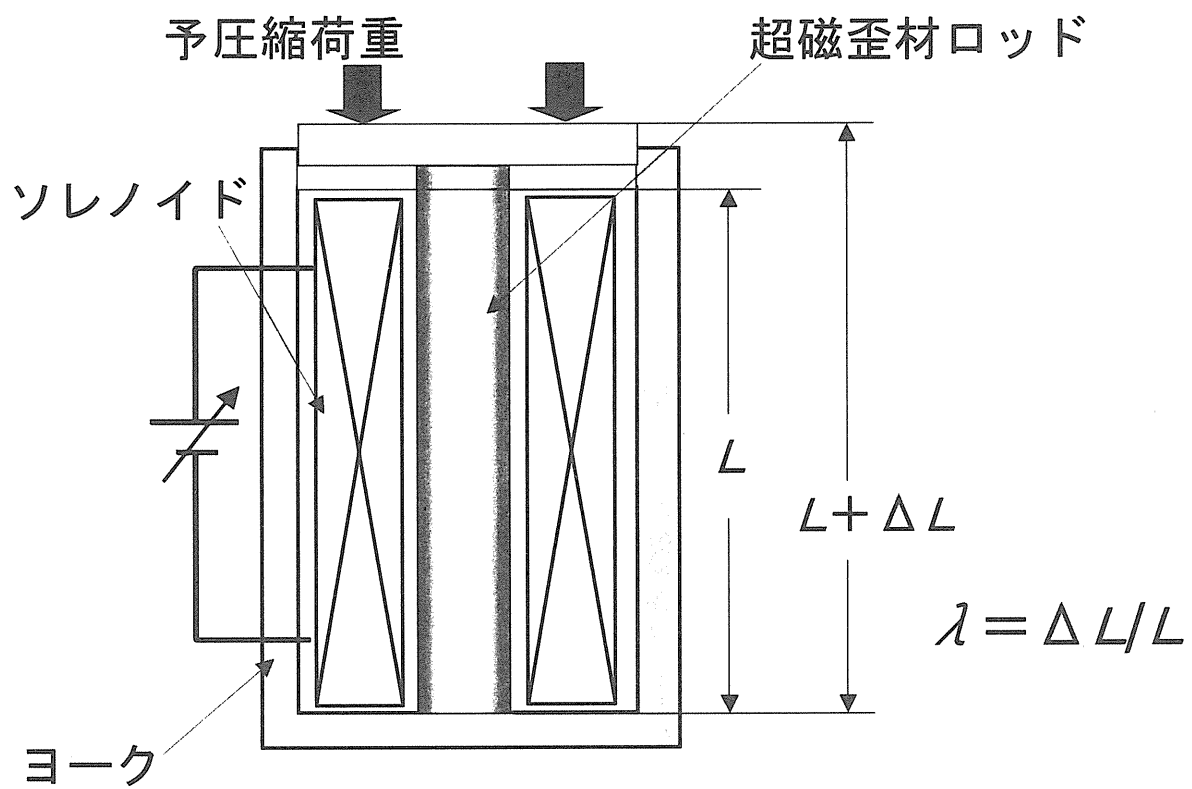


図 1-9 超磁歪アクチュエータの基本構造

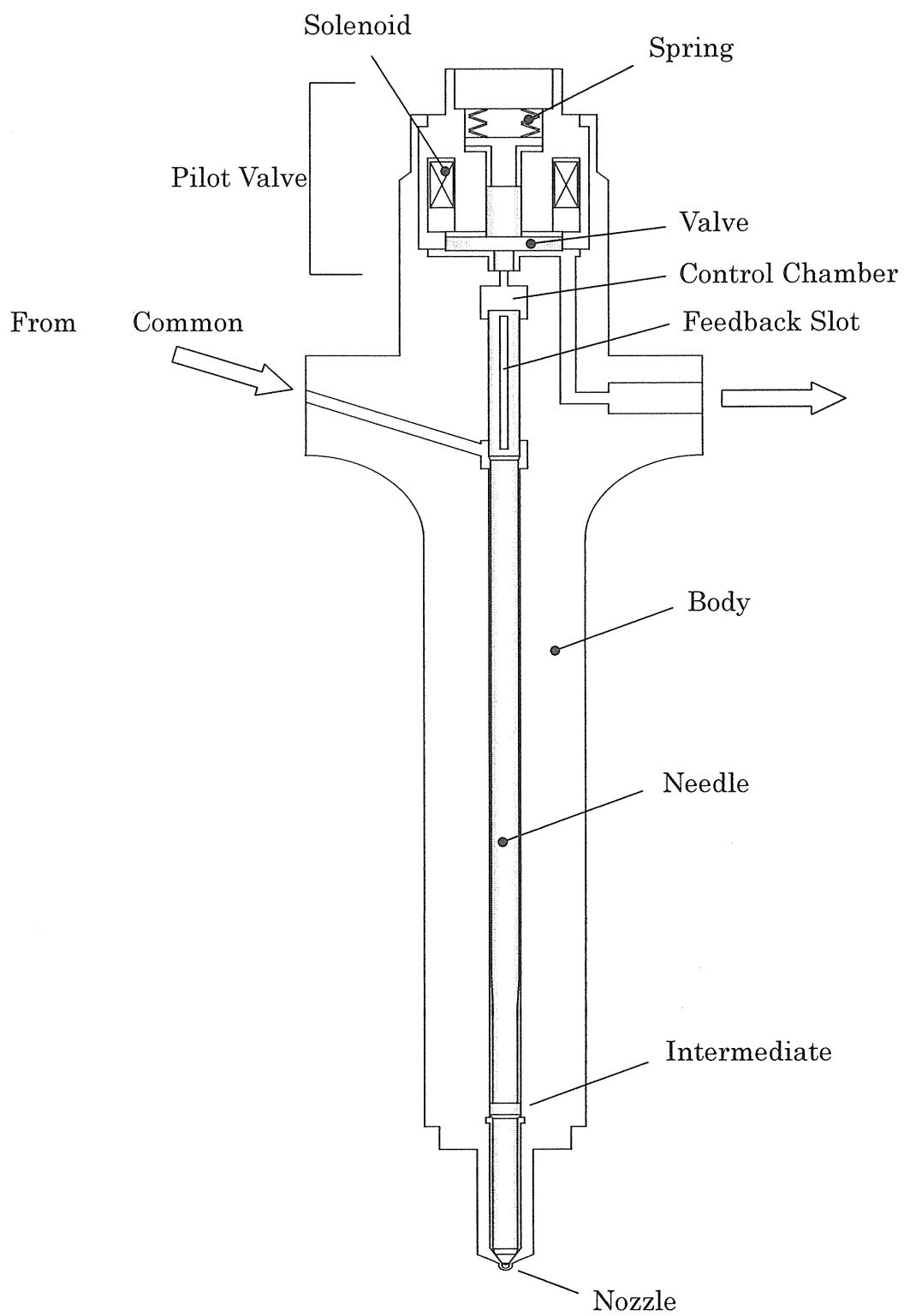


图 1-10 电子比例燃料喷射弁

第2章

超磁歪材料及び超磁歪アクチュエータ

第2章で用いる記号

a	: 格子定数
B	: 負荷圧縮荷重曲げ率
E_a	: 立方晶の磁気異方性エネルギー
E_e	: 原子間のポテンシャルエネルギー
E_u	: Co などの一軸磁気異方性エネルギー
J	: 交換積分
I_s	: 飽和磁化
K	: 結晶異方性定数
l	: 超磁歪材料長さ
Δl	: 同上長さ変化
N	: 磁壁内原子数
T_c	: 雰囲気温度
u_a	: 交換相互エネルギーと磁気異方性エネルギーの和
α_i	: 立方体の磁化の方向余弦
β_i	: 歪みの観測方向結晶軸への方向余弦
λ_s	: 飽和磁歪量
δ	: 磁壁厚さ
χ	: 磁化率
φ, θ	: 結晶の C 軸と磁化の方向とのなす角

2・1 はじめに

磁歪効果（磁歪現象）は、磁性体が磁化したときにその外形が変形する現象である。この現象は 19 世紀中頃にジュール（Joule）によって発見された物理現象である。この効果を利用すれば磁気エネルギー（実質的には電気エネルギー）を機械エネルギーに変換して利用することが出来、またこの逆に機械エネルギーを磁気（電気）エネルギーに変換することも可能である。このようなエネルギー変換素子の開発は種々なされ、超音波発生装置などに利用されてきた。変換素子用に開発された材料は、表 2-1 に示すように、鉄 Fe、ニッケル Ni、コバルト Co などの強磁性体あるいはフェライトなどの酸化物磁性体が主体であるが、その磁歪定数は $\sim 10^{-5}$ 程度と小さく、かつ大きな磁界を必要とするため、実用範囲は限られていた（図 2-1）。ところが 1963 年から 65 年にかけて、テルビウム Tb やディスポロシウム Dy などの希土類単結晶が低温で 10^{-3} 以上の巨大な磁歪が生じることが発見され、希土類—遷移金属系磁歪金属間化合物の開発が始められた。今までの磁歪材料に比べて二桁も大きい磁歪定数であることから超磁歪材料と称されており、 $\text{Tb}_{0.27\sim 0.3}\text{Dy}_{0.7\sim 0.73}\text{Fe}_{1.9\sim 2}$ の組成範囲のものが Terfenol-D (Ter ; Terbium, fe ; Iron, nol ; Naval Ordnance Laboratory, D ; Dysprosium) の名称で欧米のメーカー (Edge Technologies, Inc., Feredyn AB など) から製品化されている⁽²⁻¹⁾。

本章では、磁歪効果の理論的説明、超磁歪材料の製法及び超磁歪アクチュエータの基本構成に関して説明する。また、本研究で使用した超磁歪材料の磁気特性及び強度特性を調査し、アクチュエータ設計の為に基礎データを取得したのでその結果を示す。

2・2 磁歪効果⁽²⁻²⁾

2・2・1 強磁性体と磁区

磁性体は概略表 2-2 のように分類される。強磁性体とは、自発磁化を示す磁性体の総称である。一方、反強磁性体は、見かけ上自発磁化を示さないため、弱磁性として常磁性に含めて分類されることもある。

強磁性体は、いわゆる磁石に強く引きつけられる材料である。強磁性体が他の磁性体と大きく異なる点は、強磁性体が磁区という小磁石の集合で構成されるという点であり、この磁区の存在が強磁性の原因になっている。強磁性体が全体として必ずしも磁化していないのは、それぞれの磁区の自発磁化の方向が異なるためである。

実際にはすべての原子は電子スピンのために磁気モーメントを生じている。強磁性体の内部では、磁区ごとにスピンの方向が揃っているために、自発磁化が発生している。隣接するスピンがお互いに平行を保っているのは、強い交換相互作用の為にである。この磁区内

の飽和磁化 I_s を自発磁化と呼ぶが、温度が上昇するとスピンの熱振動のために、この平行性が徐々に破られ、その為に飽和磁化 I_s は図に示すように温度の上昇とともに低下し、ある温度 T_c で I_s は消失する。この温度がキュリー点である。キュリー点以上では I_s は生じず、常磁性体の状態となり、磁化率 χ の逆数 $1/\chi$ が、温度の上昇とともに直線的に増加していく（図 2-2）。

隣り合うスピン S_i の原子とスピン S_j の原子間のポテンシャルエネルギーは、

$$E_e = -2JS_iS_j \quad (2-1)$$

の形で現われ、 J は交換積分と呼ばれる量である。この J が、 $J>0$ であれば S_i と S_j が平行となって強磁性を生じる。つまり交換相互エネルギーを低くするために磁区内のスピンが平行となり、自発磁化が形成される。

2・2・2 磁壁

交換相互エネルギーだけを考えると、磁区は無限な大きさを持つこととなるが、実際には磁区の表面に現れる磁極によって静磁エネルギーが大きくなるので、磁区は有限な大きさとなる。磁区と磁区のこの境界を磁壁と呼ぶ。磁壁には、磁区が互いに 90° に交わっているような 90° 磁壁と、 180° に交わっている 180° 磁壁が知られている。

磁壁内では、電子スピンが一方の磁区の方からもう一方の磁区の方へと、徐々に向きを変えている（図 2-3）。磁壁の厚さは、交換相互エネルギーと磁気異方性エネルギーの和を最小値とする条件から決まる。すなわち、磁壁の厚さを N 原子、各スピン角度を一様に π/N とし、立方格子を考え、格子定数を a 、結晶異方性定数を K とすると、

$$u_a = \frac{1}{a^2 N} JS^2 \pi^2 + KNa \quad (2-2)$$

を極小にする条件、すなわち、

$$\frac{\partial u_a}{\partial N} = -\frac{JS^2 \pi^2}{a^2} \frac{1}{N^2} + Ka = 0 \quad (2-3)$$

より、

$$N = \sqrt{\frac{JS^2 \pi^2}{Ka^3}} \quad (2-4)$$

である。これより磁壁厚さ δ は、

$$\delta = Na = \sqrt{\frac{JS^2\pi^2}{Ka}} \quad (2-5)$$

となる。

2・2・3 磁気異方性

磁気異方性とは、自発磁化が結晶内で特定の軸方向を向く傾向を言う。結晶は固有の方向に磁化しやすい傾向に有り、その方向は容易磁化方向（磁化容易軸）と呼ばれている。例えば Fe では立方体結晶格子の〔100〕方向が、Ni では〔111〕方向が容易磁化方向となる。磁区が形成されるときは、そこに外部磁界や歪み力が存在しなければ、磁区磁化は容易磁化方向を向くのが安定である。容易磁化方向からの磁化の回転にはエネルギーが必要であり、一般に方向によって磁性が変化する性質を、結晶磁気異方性と呼び、特に結晶方向によって磁性が変化する性質は、結晶磁気異方性と呼ばれる。

結晶磁気異方性の大きさは、容易磁化方向から磁化を傾ける（回転させる）のに要するエネルギーで現わされる。数学的には次のように現わされ、K を異方性定数と呼ぶ。

(1) Fe, Ni などの立方晶の場合

$$E_a = K_1(\alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \cdot \alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 \quad (2-6)$$

(2) Co などの一軸異方性の場合

$$E_u = K_1 \sin^2 \varphi + K_2 \sin^4 \varphi + \dots \quad (2-7)$$

ここで α_i は立方体の磁化の方向余弦、 φ は結晶の C 軸と磁化方向とのなす角である。

このエネルギーを磁気異方性エネルギーと言い、 φ が増加するにつれて増加することから、自発磁化が C 軸を向くときが異方性エネルギーは極小となり、外部磁界が無ければ自発磁化はこの方向を向く。この自発磁化の安定方位が、磁化容易軸である。

結晶軸異方性以外にも、ある種の合金を高温から磁界中で冷却するとその磁界の方向が容易軸となる磁界中冷却効果、ある種の合金を冷間圧延する事で生じる圧延磁気異方性などがある。このように何らかの操作により異方性の方向、大きさを制御できる現象を誘導磁気異方性と言う。

2・2・4 磁化過程

強磁性体に磁場を加え、その強さを増していくと、自発磁化は磁壁移動もしくは回転磁化と言う技術磁化過程を経てその方向を変え、 $H=H_s$ で完全に自発磁化の方向が揃い、強磁

性体の磁化 I は飽和に達する (図 2-4)。すなわち磁場 H が印可されると、磁壁は H から力を受け、少しずつ移動する。その結果 H に平行な磁区が増加し、磁性体が磁化していく。

磁壁移動中でも自発磁化は常に磁化容易軸を向いているので、磁区の内部エネルギーは変化しない。このため磁壁の移動を妨げる要因が無ければ磁壁移動は極めて低い磁場で終了する。

磁界の方向が容易軸と異なる場合には、まず磁界に近い方向の磁区の量が磁壁移動によって増加する。磁壁移動が終了した後、自発磁化は磁区の中で回転し、更に磁化が進行する。この過程を回転磁化と言う。磁気異方性が大きいほど、回転磁化を起こすには大きな磁場が必要となる。

2・2・5 磁歪効果

前述の通り、各磁区は自発磁化をもち、磁性体の結晶格子は自発磁化の発生に伴って図 2-5(a) のようにすでに歪んでいる。消磁状態 ($H=0$) から、外部磁界を加えて各磁区の自発磁化の方向をそろえていくと、自発磁化の回転に伴って自発磁化の歪みもそろっていき、全体として外形の変化が現れ飽和に達する (図 2-5(b))。この飽和値 λ_s を磁歪定数という。ただし、磁歪量は結晶方位に関係を持つため方位によりその定数は、 λ_{100} 、 λ_{111} のように定める。このように磁性物質に対し、外部から磁界を加えると外形変化の生じる現象を Joule 効果と呼ぶ。逆に磁性体に外部から応力を加え変形をさせると磁化状態が変わる現象を Villari 効果と呼び、磁歪の逆現象、逆磁歪という。

このような磁歪 (磁化方向の歪み $= \Delta l / l$) は、Fe、Ni などの立方晶磁性体を例に考えた場合、磁化の結晶軸への方向余弦 ($\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$) および歪みの観測方向結晶軸への方向余弦 ($\beta_1 \beta_2 \beta_3$) を用いて、次式のように表わすことができる。

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{3}{2} \lambda_{100} \left(\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - \frac{1}{3} \right) + 3 \lambda_{111} (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1) \quad (2-8)$$

次に、多結晶あるいはアモルファス構造のように等方対として扱ってよい場合には、 $\lambda_{100} = \lambda_{111} = \lambda_s$ として (2-8) 式は次式のように簡略できる。

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{3}{2} \lambda_s \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) \quad (2-9)$$

ここに、 θ は磁化と歪みの測定方向のなす角度、 λ_s は飽和磁歪値である。また多結晶においては、 λ_s 、 λ_{100} 、 λ_{111} の間に次式の関係が成立する。

$$\lambda_s = 0.4 \lambda_{100} + 0.6 \lambda_{111} \quad (2-10)$$

このように、飽和磁化状態における歪量を求めることにより飽和磁歪定数 λ_s が得られ、また単結晶を用いた角結晶軸方向の歪量から λ_{100} 、 λ_{111} の磁歪定数を求めることができる。なお希土類金属などの六方晶系においても同様の記述が可能であり、(2-8)式の代わりに次式で表わせる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} = & \lambda^{\alpha 1,0}(\beta_1^2 + \beta_2^2) + \lambda^{\alpha 2,0} \beta_3^2 + \lambda^{\alpha 1,2} \left(\alpha_3^2 - \frac{1}{3} \right) (\beta_1^2 + \beta_2^2) + \lambda^{\alpha 2,2} \left(\alpha_3^2 - \frac{1}{3} \right) \beta_3^2 \\ & + \lambda^{\gamma 1,2} \left[\frac{1}{2} (\alpha_1^2 - \alpha_2^2) (\beta_1^2 - \beta_2^2) + 2\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 \right] + 2\lambda^{\varepsilon,2} [\alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1] \end{aligned} \quad (2-11)$$

図2-6に立方晶の磁歪モード： λ^α 、 λ^γ 、 λ^ε および六方晶の磁歪モード： $\lambda^{\alpha 1}$ 、 $\lambda^{\alpha 2}$ 、 λ^γ 、 λ^ε を示す。また、磁歪による磁性体の変形には線磁歪に加えて体積を伴った体積磁歪が存在し、図の λ^α 、 $\lambda^{\alpha 1}$ 、 $\lambda^{\alpha 2}$ がこれに相当する。

2・3 超磁歪材料及び超磁歪アクチュエータについて

2・3・1 超磁歪材料⁽²⁻³⁾

超磁歪材料の開発研究は、1959年にアメリカ海軍戦略研究所(Naval Ordnance Laboratory)のA.E.Clark博士らによって開始された。1960年代初頭までに、重希土類金属は極低温で巨大な磁歪(約1%)を示すことが明らかになった。しかし希土類はキュリー温度(Tc)が低いため、室温では常磁性となり磁歪はごくわずかししか生じない。1970年代からは希土類と鉄族の合金の研究が開始された。希土類R(Sm,Tb,Dy,Ho,Er,Tm)に鉄族T(Ni,Co,Fe)を加えると化合物や非晶質合金が出来、その中の一部は室温より高いTcを持つことが分かった。従ってRT合金は巨大な磁歪(超磁歪)と高いキュリー点を同時に実現できる可能性が示された。調査されたRT合金の中から、実際に始めてTbFe₂合金が、室温にて超磁歪が観察された。その結果1974年に磁気異方性補償型合金Terfenol-Dが開発され、アメリカを始め欧米および日本を中心としたアジアでの材料開発が進んでいる。

2・3・2 Terfenol-D

TbFe₂は現在までで最大の室温磁歪を示しているが、磁気異方性が大きく、磁歪の発現に

は大きな磁界が必要となる。しかし RFe_2 化合物の異方性は R によって方向と極性が違うため、 R の種類と成分比を適当に組み合わせて擬二元化合物 $RR'Fe_2$ をつくることで異方性を小さくすることが出来る。 $DyFe_2$ も磁気異方性が大きい、異方性の極性は $TbFe_2$ と反対である。従って異方性が小さくなる可能性が有るのは、 $Tb_{1-x}Dy_xFe_2$ 型合金である。最終的に低磁場で高い磁歪を発生する $Tb_{0.27\sim 0.30}Dy_{0.70\sim 0.73}Fe_2$ 型合金が開発された(表 2-3)。この素材名称 “Terfenol-D” は材料組成と開発元にちなんで命名されている。Terfenol-D は磁気異方性を低下させて回転磁化を容易にする方向で開発が進んでいたが、現在は容易軸 $[111]$ へ配向させる製法も開発されてきており、さらなる磁歪特性の向上が図られている。

2・3・3 製造法

低磁場で大きな磁歪を得るためには、磁歪材料を容易軸方向に配向させるのが最も効果的である。その配向させる製造法には、従来は Bridgman 法が主流であった。これは、Terfenol-D 組成合金が、冷却方向に特定方位の結晶成長をすることを利用した製法である。原料を鉛直に釣り下げたるつぼの中で溶かし、それを取り囲む加熱炉の温度勾配を使って一方向に凝固させる。結晶成長方向の $[112]$ は、Terfenol-D の容易軸である $[111]$ から 19° ずれている。

Bridgman 法は正確な結晶成長のために清浄度の高い材料が必要である。また均一な冷却速度が必要なため、生産性が悪く、生産コストが高い。

近年 TDK (株) 基礎材料研究所により開発された粉末冶金法(図 2-8)は、低コスト、低ヒステリシス、最終製品近い形状で作れる、金型による量産が可能などの点で、Bridgman 法より優れている。粉末冶金法として一般的に知られている技術は、粉末材料を型に押し込み、圧縮成形し、それを焼結する方法である。焼却温度は製品または成分の融点より低い、拡散現象が作用して粒子が結合する。通常の粉末冶金法の利点は、融解、凝固、機械加工等の工程無しに、最終製品に近い形状のものを大量にかつ容易に製造できる点である。すなわちコスト、歩留まりの点で有利となる。超磁歪材料の製造で重要なのは、成形を磁場中で行って材料粉末を回転させ、製品を $[111]$ 方向に配向させる点である。

2・3・4 超磁歪アクチュエータ

超磁歪材料をアクチュエータとして用いるときの基本構成を図 1-9 に示す。

材料の回りに巻かれたコイルに電流と通す事で磁場が発生し、これにより超磁歪材料がひずみ、アクチュエータとしてのストローク Δl を得る。 Δl としては、1000~2000ppm 得る事が出来る。

歪はプラス入力電流でもマイナス入力電流でも同じ方向に発生するため、入力に対し 2

倍の周波数のストロークとなる。これを防ぐには、コイルにDC電流（ナル電流）を流して予め超磁歪材料を歪ませておき、その電流を中心に励磁することで解消できる。ナル電流の変わりに、磁気回路中に磁石をセットすることでも同じ効果を得る事が出来る。

図 2-9 に、超磁歪材料の代表的磁歪特性を示す。磁場が 50kA/m 程度までに急激に磁歪が増加し、その後飽和していく。またヒステリシスを持つ。使用する際には、この非線形挙動を良く理解することが必要である。

なお図中の応力値 σ_p は、プリストレス（圧縮応力）である。図 2-9 でも見られるように、超磁歪材料にかけられたプリストレスにより、磁歪の様子が大きく変化する。図 2-10 にプリストレスに対する磁歪-磁界曲線を示す。圧力が大きくなると磁歪の立ち上がりが高磁界側にシフトするが、飽和磁歪は大きな値となる。しかし圧力が大きくなりすぎると、超磁歪材料の出力がうち負け、飽和磁歪が小さくなっていく。従って、超磁歪材料の磁歪を有効に使用するには、適当なプリストレスを与えるのがよい。

2・4 超磁歪材料の磁気、機械的特性

本研究で用いた超磁歪材料は、コスト及びヒステリシス特性は優れているという面から、粉末冶金法による材料を用いた。本超磁歪材料は、上記理由から工業的には Bridgman 材より優れているが、潜在的に気孔を含むため、磁歪量、強度では劣ることが予想される。

そこで、本研究で用いた超磁歪材料の磁気特性及び強度特性、特に圧縮強度特性に関し調査し、アクチュエータ設計への基本データを取得した。

2・4・1 磁気特性

(1) 供試材

本研究で使用した試料は、粉末冶金法による Terfenol-D 型超磁歪材料であり、組成は $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.85}Co_{0.04}$ 、充填率は約 85.3% である。なお充填率は、Bridgman 材の充填率 100% の緻密材とみなし、その密度 ($9.16g/cm^3$) と本材料の密度との比から求めた。試験片寸法は、今後のアクチュエータに用いていく、 $\phi 3.5 \times L30$ (直径 x 長さ) の擬円柱である。試験片に一樣な圧縮応力を負荷できるよう、すなわち偏荷重による曲げモーメントが材料にかからないよう、端面の寸法精度（直角度、平行度）を、5/1000 以内に成るよう、精密加工した。試験片形状及び外観を図 2-11, 12 に示す。今回試験した試験片の寸法測定結果を表 2-4 に示す。

(2) 実験装置

磁場発生装置を図 2-13、14 に示す。コイルと純鉄製の鉄心で一对の電磁石を構成し、コイルの電流を流すことにより磁場を印可する。最大 1.35A の電流によって 164kA/m の磁場を発生できる。試験片中心軸とプリストレスの方向を一致させるため、試験片の上下端面との接触部はガイド付きの球面座となっている。プリストレスは万能試験機によって与える。閉磁路を構成するため、磁束が通る部品は高透磁率の純鉄であり、その他の部品は非磁性材料（SUS304，BC6）である(図 2-15，16)。

磁歪は歪みゲージにより検出した。歪みゲージを貼る位置により歪み量に多少のばらつきが出るため、試験片中心に 2 枚のゲージを貼り、その平均値を試験片の磁歪とした(図 2-17)。

試験片に負荷された磁束密度は、試験片の周りに巻いたサーチコイルにて検出し、歪み量と共に、コンピュータに記録した。

(3) 実験結果

試験結果を図 2-18 から 23 に示す。

これらデータより、以下のことが分かった。

- ・ 磁歪特性は非線形性があり、ヒステリシスも大きい。
- ・ B-H特性も、非線形性、ヒステリシスが有る。
- ・ 透磁率は、8 程度で、かなり低い。
- ・ 磁気特性、磁歪特性とも大きなばらつきが無い。
- ・ プリストレスには、最適な負荷範囲がある。

このように超磁歪材料は透磁率が空気に対して 5 から 10 倍程度ととても低いため、効率よく磁歪量を得るには、磁気回路設計が大切となる。今後、本磁気特性（B-H特性）を用いて、今後のアクチュエータ設計時の代表特性として解析に用いた。

2・4・2 機械的特性⁽²⁻⁴⁾

(1) 供試材

使用した試料は、磁気特性を調査したのと同じ粉末冶金法による Terfenol-D 型超磁歪材料（ $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.85}Co_{0.04}$ ）である。試験片寸法は、同じく今後のアクチュエータに用いていく $\phi 3.5 \times L30$ の擬円柱である。表 2-5 に各供試材の寸法を示す。強度のばらつきの評価をするため、13 本のサンプルで試験を行った。

(2) 実験装置

静的圧縮試験装置を図 2-24 に示す。試験片の上下端を無潤滑の状態にして圧縮板で挟み、加圧子を介して万能試験機で軸方向に圧縮する。万能試験機と加圧子の間に鋼球をいれ、加圧子がシリンダーに沿って移動することで一様な圧縮荷重が付加される。圧

縮板の形状は軸の調心が行いやすいように球面とした。試験片との接触面の表面粗さは中心線平均粗さで $0.2\mu\text{m}$ とした。万能試験機の Crosshead Speed は 0.05mm/min とした。荷重はロードセルにより検出し、ひずみはひずみゲージにより検出する。超磁歪材料の圧縮試験では、ファインセラミックスの圧縮試験と同様に、破壊時に音及び閃光と共に試験片が粉々となり、強い勢いで飛散する。このため試験片を囲むようにセロハンテープを貼り、破片の飛散を防止した(図 2-25)。

歪みゲージは試験片の軸方向に 1 対 2 枚を貼り、データロガーに表示される歪みがほぼ一致するように試験片の位置決めをすることで、軸の調心を行った。歪みゲージから得られるデータを用いて、歪みデータ取得と主に、荷重増大に伴う試験片に生じる曲げを評価した。最大歪み量 ε_{\max} 、最小歪み量 ε_{\min} 及び平均歪み量 $\varepsilon_{\text{average}}$ を用い、次式から曲げ率 $B(\%)$ を算出した。

$$B = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{2\varepsilon_{\text{average}}} \times 100 \quad (\%) \quad (2-12)$$

(3) 実験結果

図 2-26 から 38 一軸圧縮試験における粉末冶金超磁歪材料の応力-歪み線図を示す。約 50MPa 以下の低応力域では、下に凸の非線形性を示した。それ以降ではほぼ線形関係であった。最大荷重後の荷重降下域は見られず、突然破壊した。破壊強度に近づくにつれて亀裂の進展が安定成長過程から不安定成長過程に移行し、材料内部の亀裂密度が急増していると考えられる。

線形部での弾性率を算出すると、平均で約 80GPa 程度となった。弾性率 E は非磁性体では定数であるが、強磁性体では磁化により変化する量である。強磁性体に荷重を加えると磁壁移動、回転磁化が生じ、自発磁化方向が変化する。圧縮荷重付加のときは荷重軸方向の磁区の量が減少し、荷重軸に垂直に近い方向の磁区の量が増加する。このために生じる歪み(磁歪)が結晶本来の機械的歪みに加わり、余計に歪みが生じる。強磁性体の弾性率 E は結晶本来の弾性率 E_0 から変化分 ΔE だけ減少するので ($E=E_0-\Delta E$)、 ΔE 効果と呼ばれる。 ΔE 効果は、磁歪の存在により生じるもので、磁歪量に比例する。図に現れた低応力域の応力-歪み関係の非線形性はこの ΔE 効果によるものである。磁壁移動が完了するにしたがって弾性率は増加し、結晶本来の弾性率に近づく。

圧縮強度の平均値は 404MPa である(表 2-6)。Bridgman 材は 894MPa であったことから、そのほぼ半分の値であった。これは粉末冶金材に内包する気泡の影響および今回の試験片のアスペクト比(約 8.6)に起因するものと考えられる。

図 2-39 に、試験片の圧縮強度のワイブルプロットを示す。破壊確率の算出は、ミーンランク法に依った。プロットには、材料外周を加工し、径 3mm の円筒に仕上げた材料の試験結果も同時にプロットした。

本試験片のワイブル形状母数は 10.1 であった。これは Bridgman 材の値にほぼ近いものであり、本材料は強度特性のばらつきは小さく、工業的に使いやすい材料と言える。

第 2 章参考文献

(2-1) 江田、超磁歪材料とその応用研究に関する国際的展望、精密工学会誌、60-12(1994)、1683-1690

(2-2) 加藤、磁気・磁性材料、日刊工業新聞(1991)、49-69

(2-3) 森、注目される超磁歪材料とその応用、工業材料、42-9(1994)、54-64

(2-4) 中村、野口、山口、中林、粉末冶金法により製造された超磁歪材料の強度特性、日本機械学会論文集 A、64-627(1998)、2819-2825

表 2-1 各種磁歪材料の磁気歪定数

系	材 料	磁気歪定数 $\lambda_s \times 10^{-6}$
金 属 系	Ni (軟)	-40
	Ni (半硬)	-35
	Ni-4.5%Co	-33
	Ni-18.5%Co	-23
	Ni-Fe (45 パーマロイ)	27
	Fe-r (2V パーマンジュール)	70
	Fe-A (13 アルファ, 13 アルフェル)	40
	アモルファス Fe-Co-Si-B	30~35
フ ェ ラ イ ト 系	Ni フェライト (Ferrocube 4E)	-27
	Ni-Co フェライト (Ferrocube 7B)	-27
	Ni-Cu-Co フェライト (Vibrox II)	-28
	Ni-Cu-Co フェライト (Vibrox I)	-28
	Ni-Cu-Co フェライト (Ferrocube 7A1)	-30
	Ni-Cu-Co フェライト (Ferrocube 7A2)	-28
	マグネタイト (Fe_3O_4 , CoO , TiO_2 , SiO_2)	60
希 土 類 化 合 物 系	TbFe_2	1750
	DyFe_2	433
	ErFe_2	-299
	TmFe_2	-123
	SmFe_2	-1560
	$\text{Tb}_{(0.27 \sim 0.3)}\text{Dy}_{(0.7 \sim 0.73)}\text{Fe}_{(1.9 \sim 2.0)}$	2500

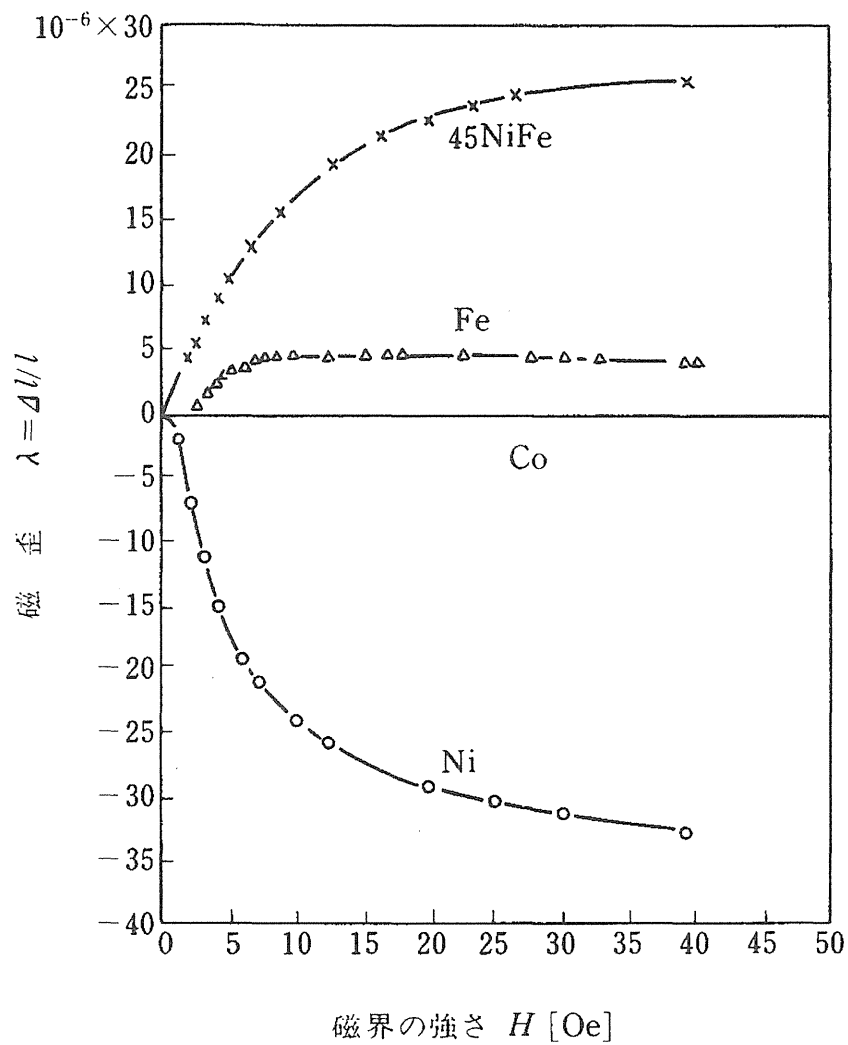


図 2-1 Fe, Ni, Co 及び 45Ni-Fe 合金の磁歪

表 2-2 磁性体の分類

a	強磁性	<div> <div>フェロ磁性</div> <div>フェリ磁性</div> </div>
b	反強磁性	
c	常磁性	
d	反磁性	

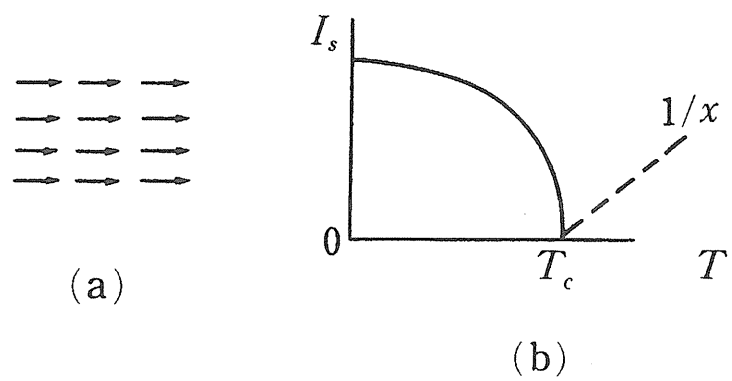


図 2-2 フェロ磁性

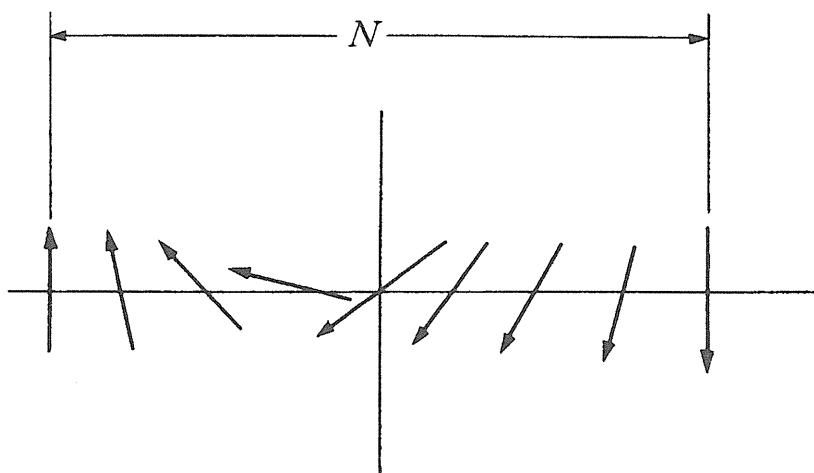


図 2-3 磁壁内のスピン

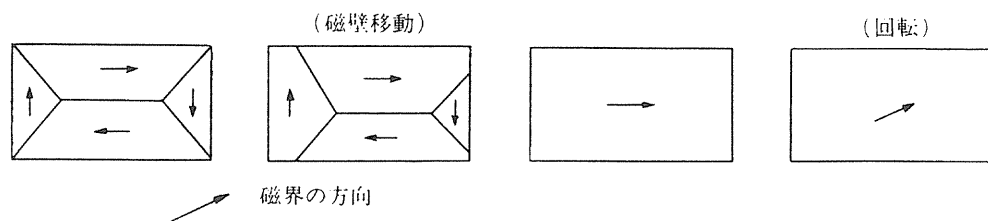


図 2-4 磁化に伴う磁区の変化

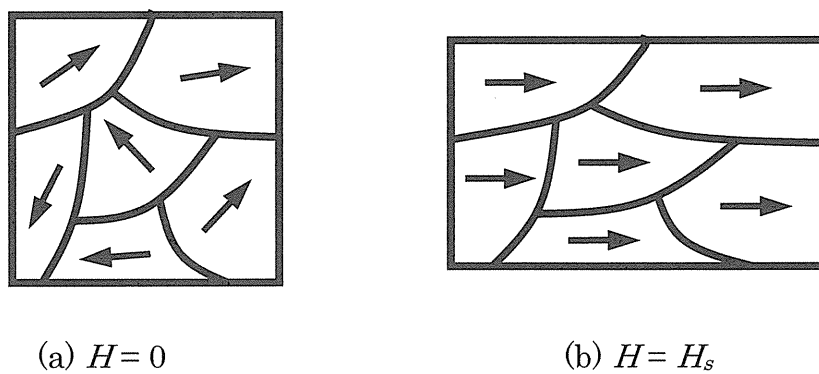


図 2-5 磁性体に外部磁界を印加した場合の外形変形

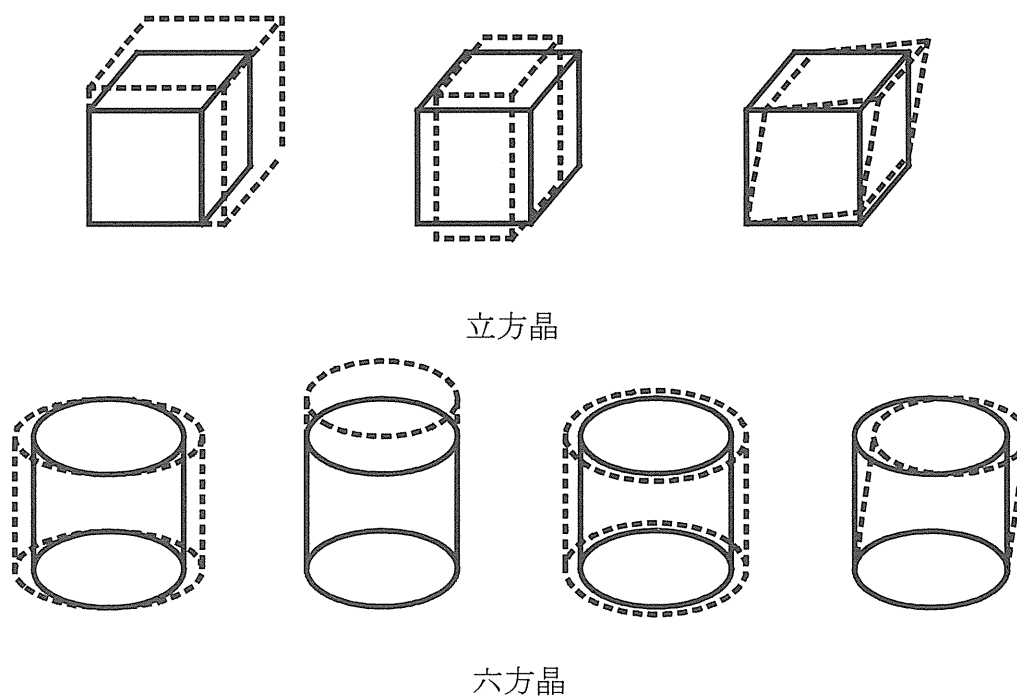


図 2-6 立方晶及び六方晶における各磁歪モード

表 2-3 TbFe₂ と DyFe₂ の磁気特性

性 能	TbFe ₂	DyFe ₂	Tb _{0.3} Dy _{0.7} Fe ₂ (Terfenol-D)
磁歪 λ_{111} (300K)	2.5×10^{-3}	1×10^{-3}	$(1.5 \sim 2.0) \times 10^{-3}$
磁気異方性エネルギー K_1 (erg/cm ³)	-7.6×10^7	$+2.1 \times 10^7$	~ 0 (軟磁性)
磁気容易軸	[111]	[100]	[111] \longleftrightarrow [100]
キュリー温度 T_c (K)	704	635	653

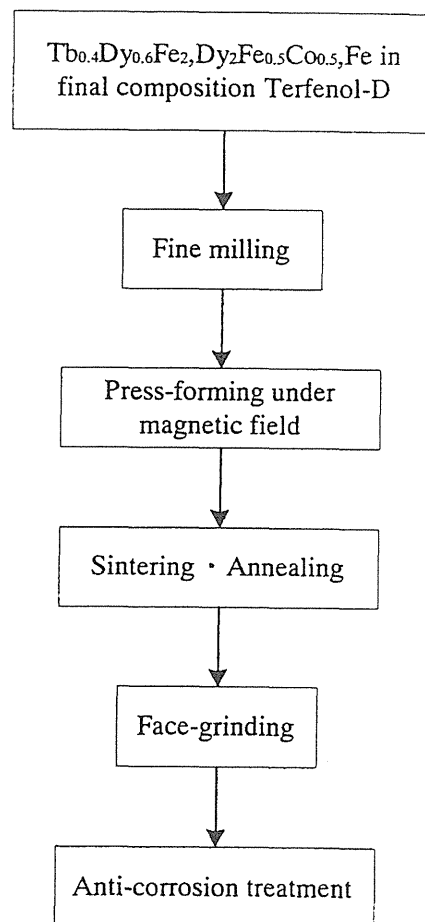


図 2-8 粉末冶金材製造方法

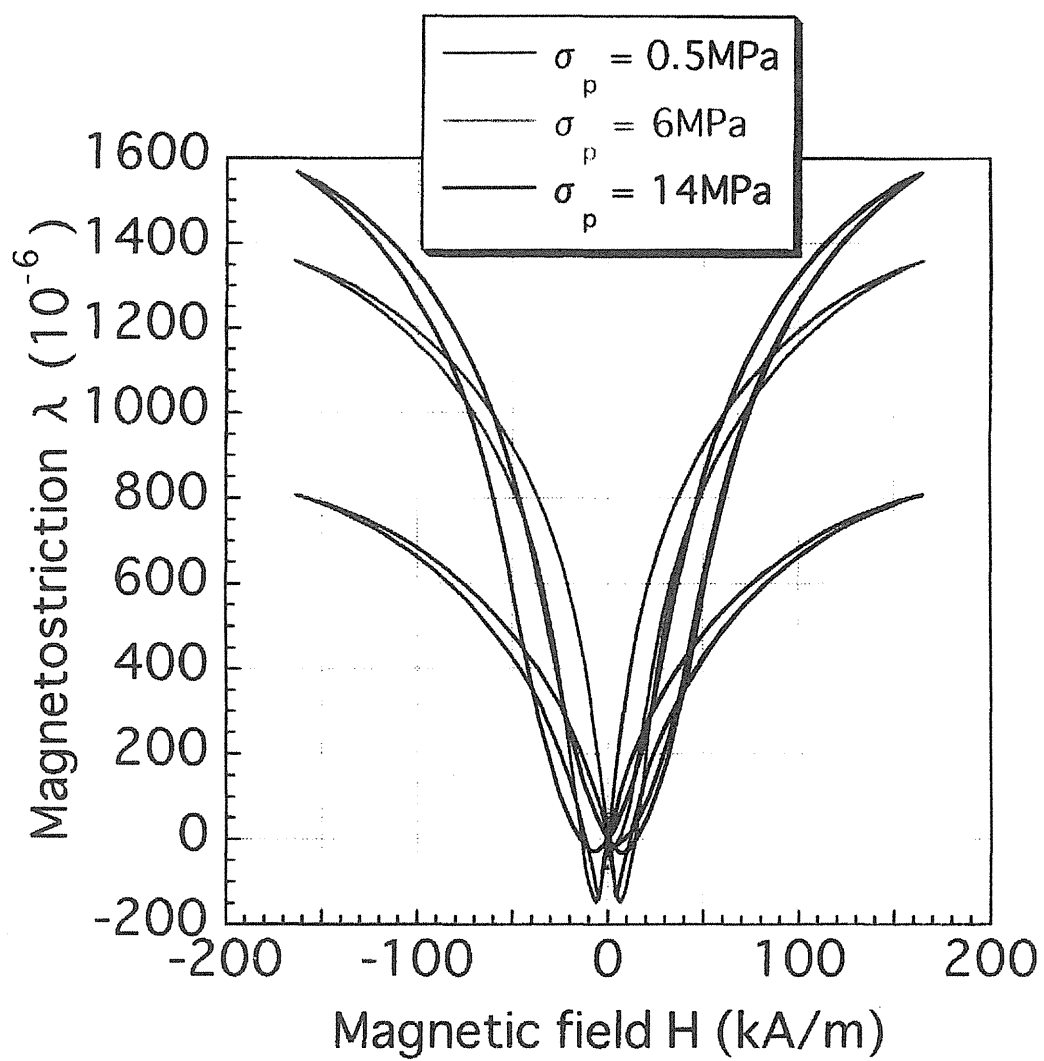


图 2-9 磁歪特性(代表例)

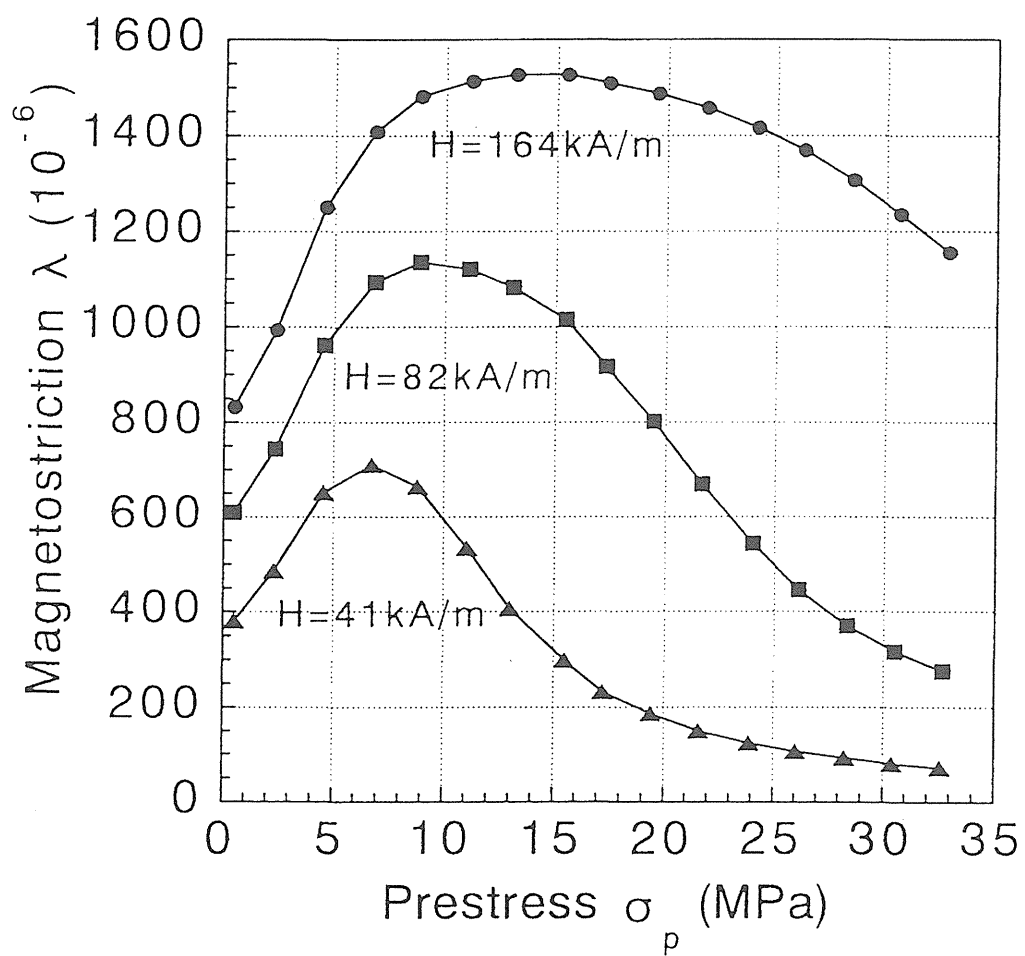


図 2-10 プリストレスの磁歪特性への影響

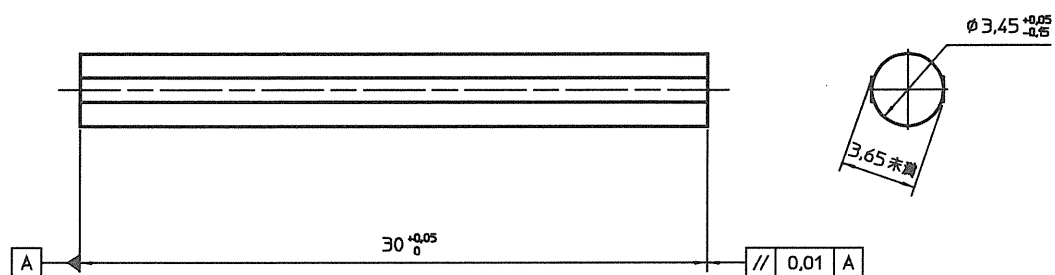


图 2—11 試驗片（超磁歪材料）形状

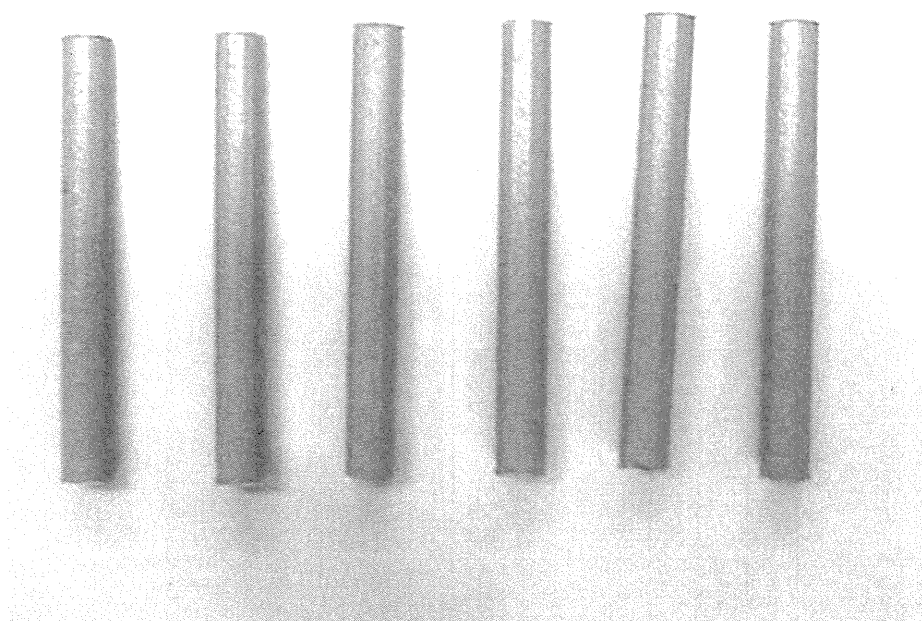


图 2—12 試驗片外觀

試験片寸法

No.	外形(mm)				幅(mm)				軸長	質量
	left	center	right	Average	left	center	right	average	(mm)	(g)
49	3.524	3.538	3.572	3.545	3.390	3.397	3.383	3.390	29.95	2.191
50	3.589	3.515	3.520	3.541	3.385	3.390	3.398	3.391	29.80	2.197
51	3.491	3.505	3.578	3.525	3.396	3.388	3.383	3.389	29.85	2.174
52	3.555	3.522	3.523	3.533	3.385	3.390	3.384	3.386	29.83	2.191
53	3.530	3.534	3.550	3.538	3.404	3.399	3.397	3.400	29.85	2.209

※ 外形(円形部)及び幅(平坦部)はマイクロメータで、軸長はノギスで、質量は電子天秤でそれぞれ測定。

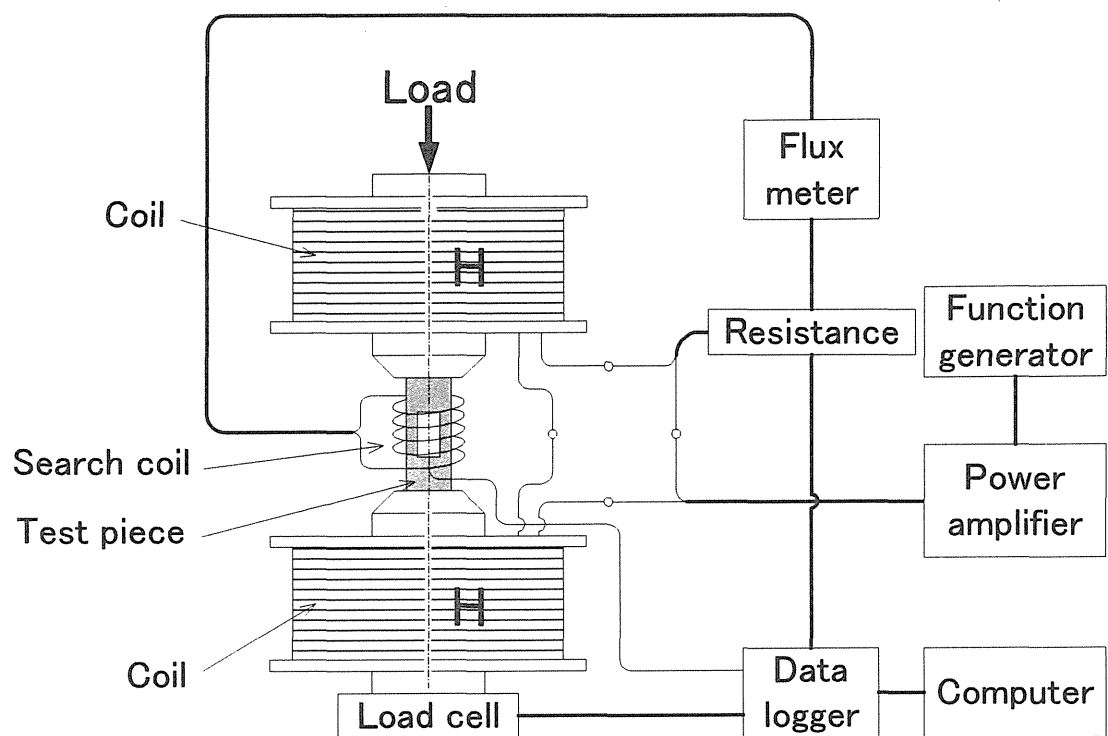


図 2-13 磁場発生装置概要

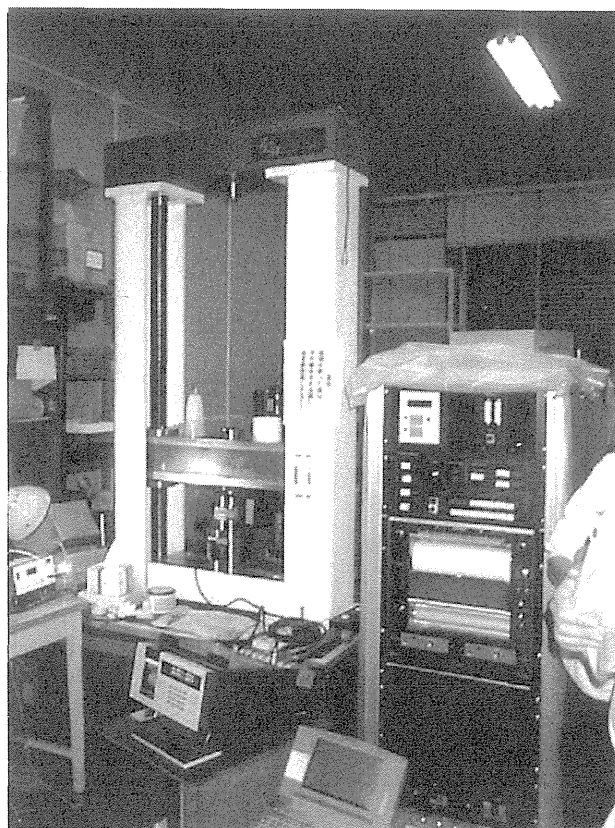


図 2-14 試験装置外観

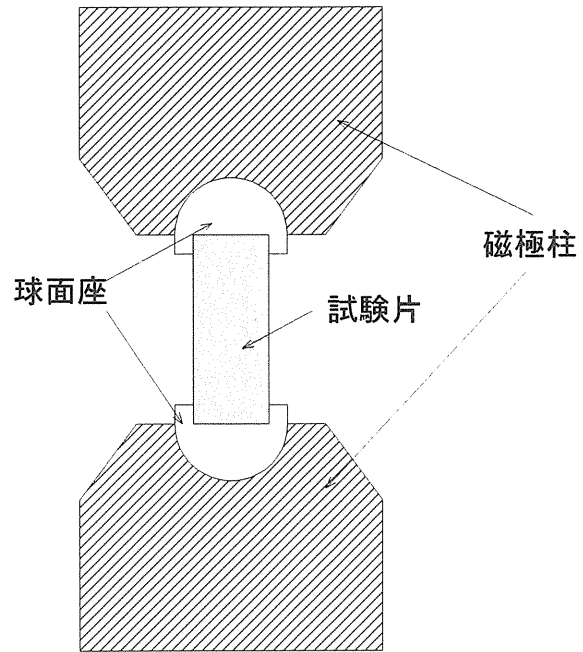


图 2-15 試驗片設置狀態

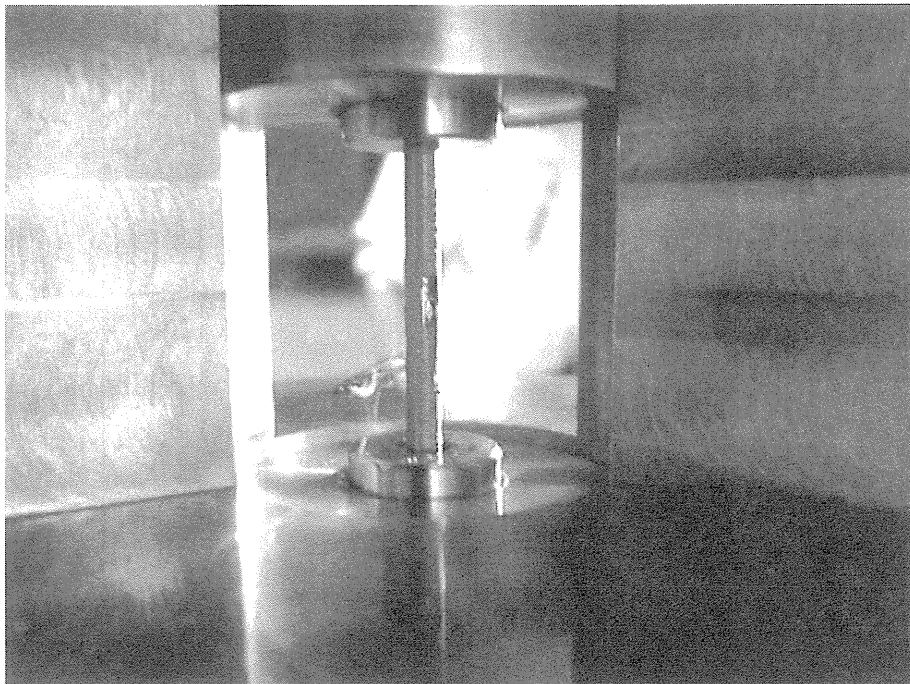


图 2-16 試驗片設置狀態外觀

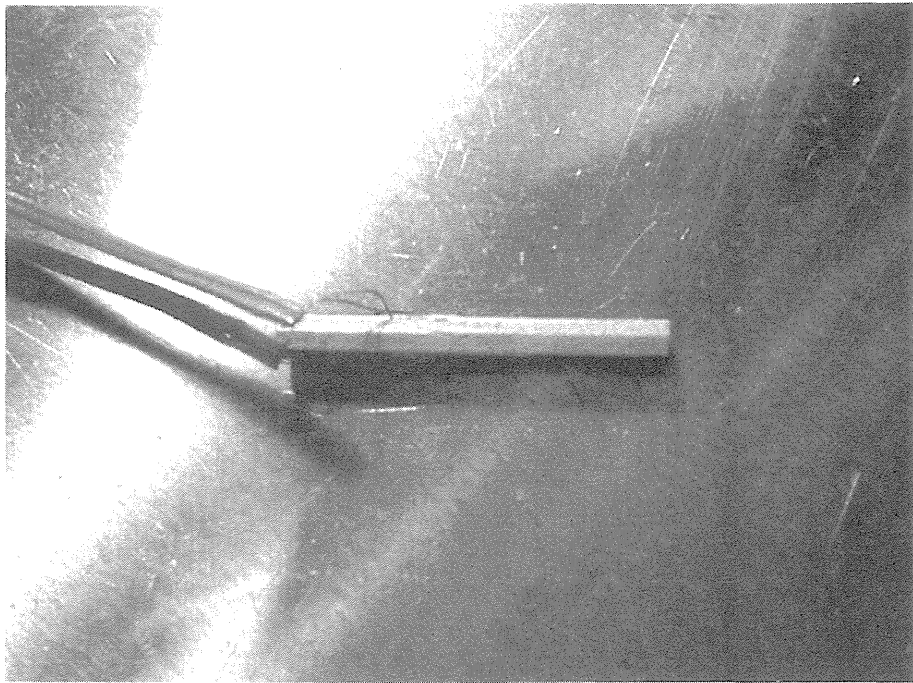


図 2-17 歪みゲージ貼り付け

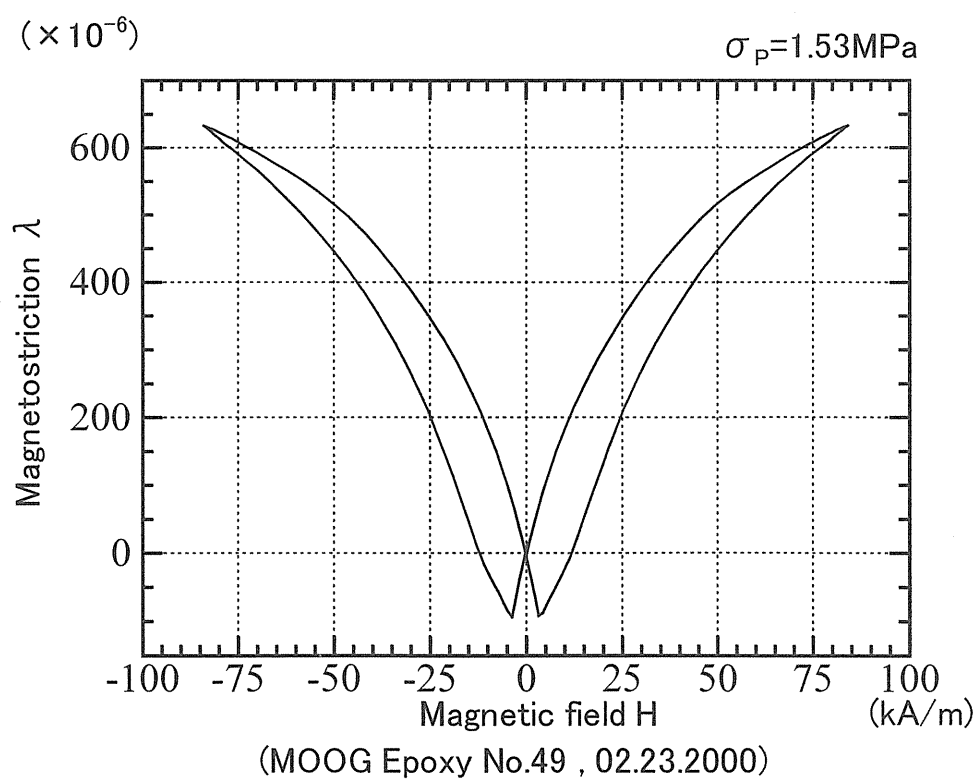
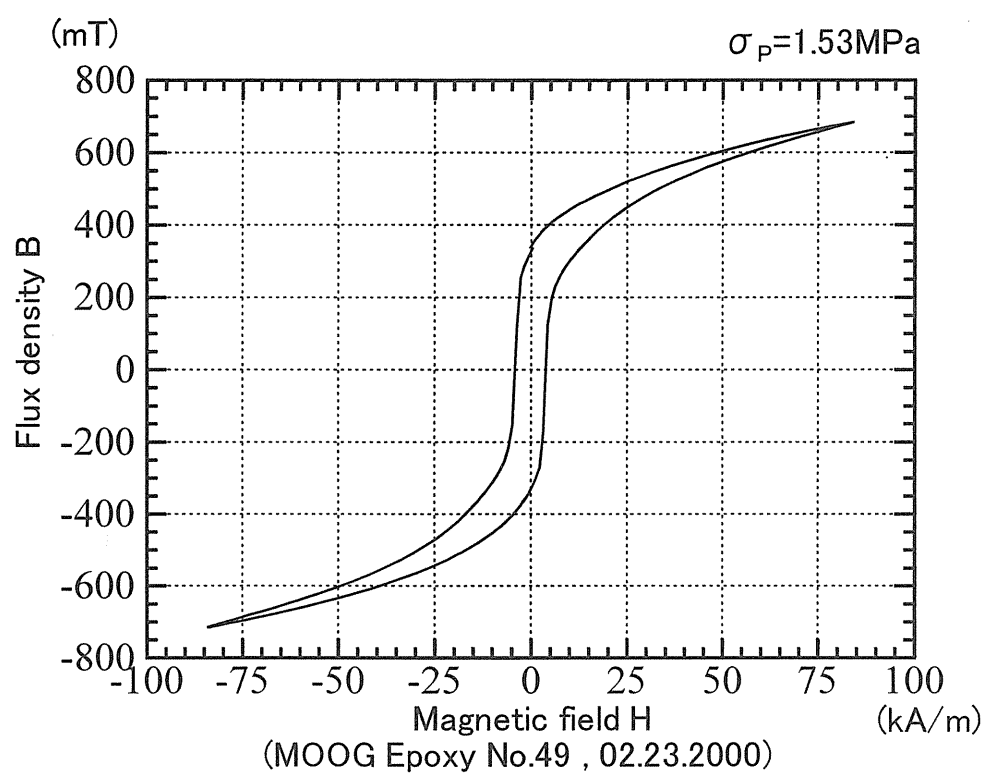


図 2-18 磁気特性、磁歪特性試験結果(No.49)

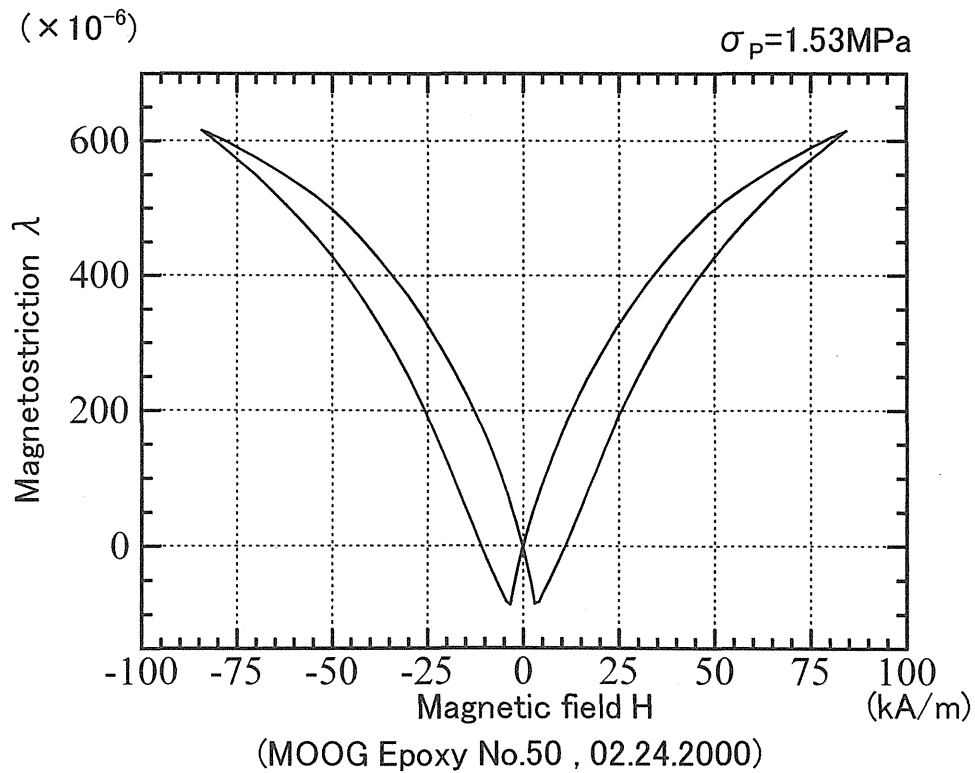
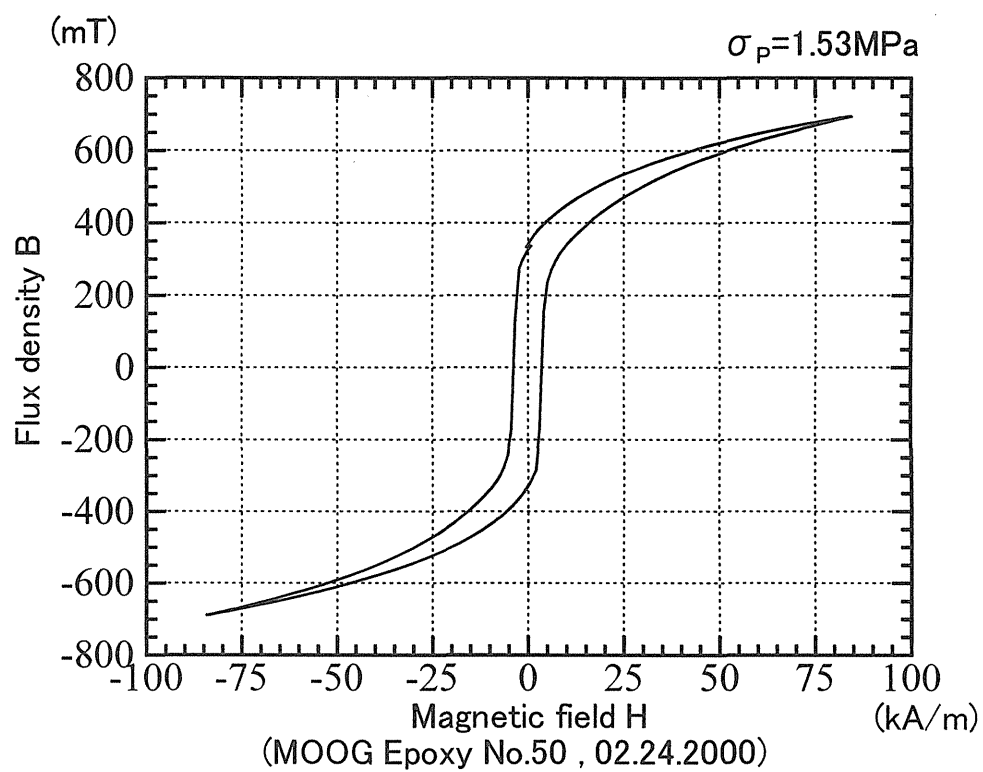


図 2-19 磁気特性、磁歪特性試験結果(No.50)

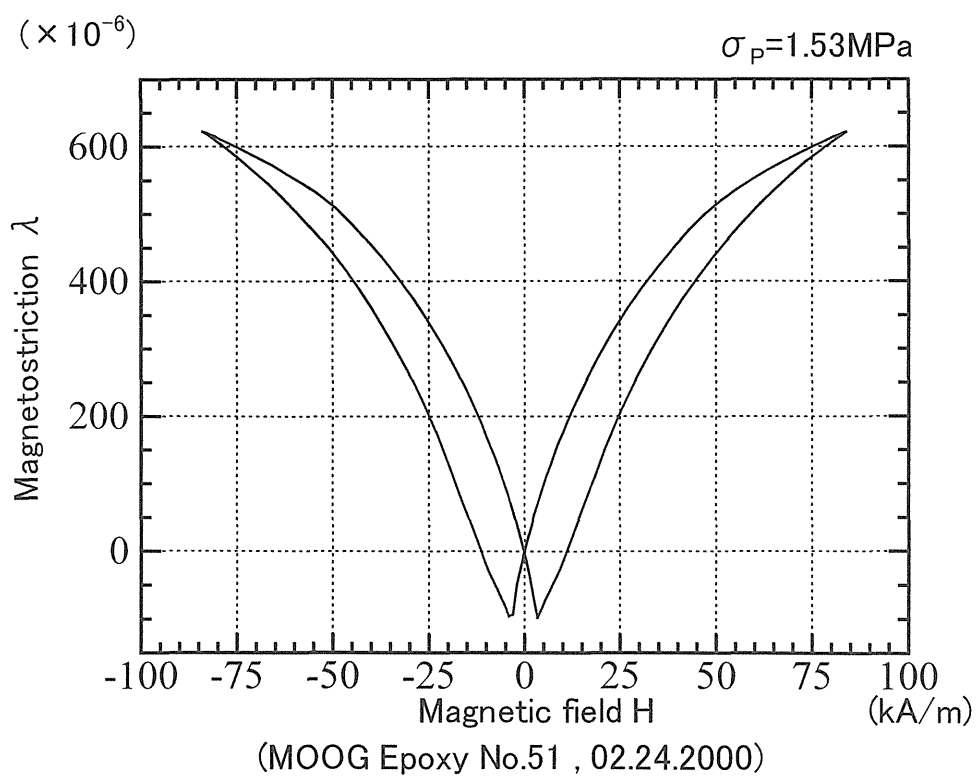
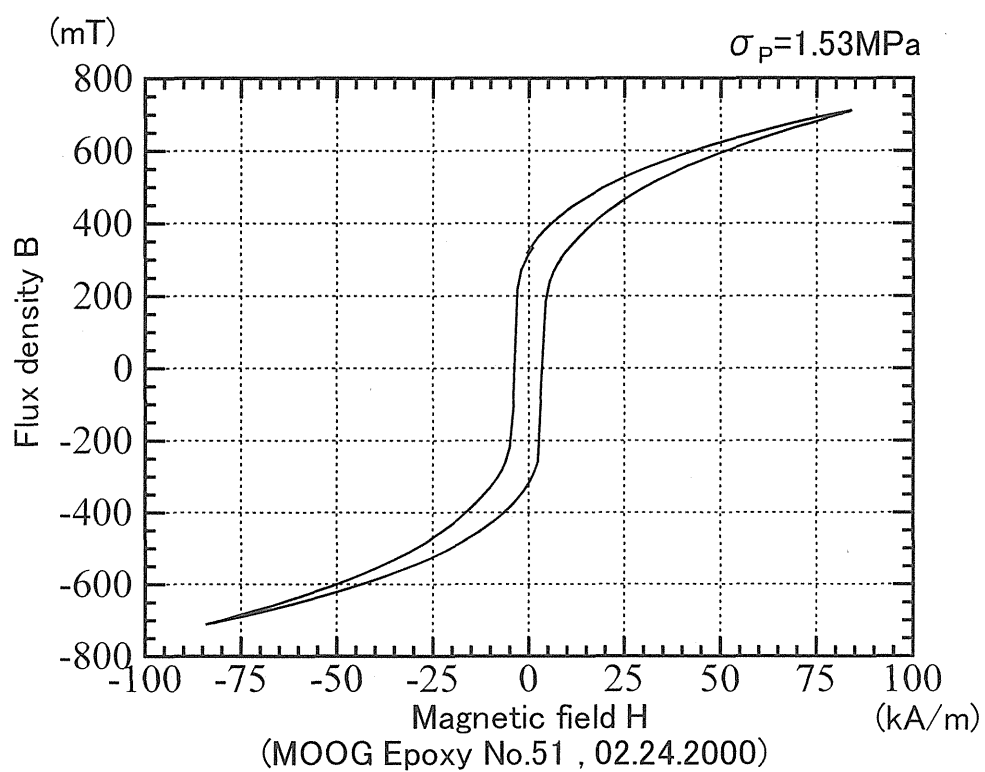


図 2-20 磁気特性、磁歪特性試験結果(No.51)

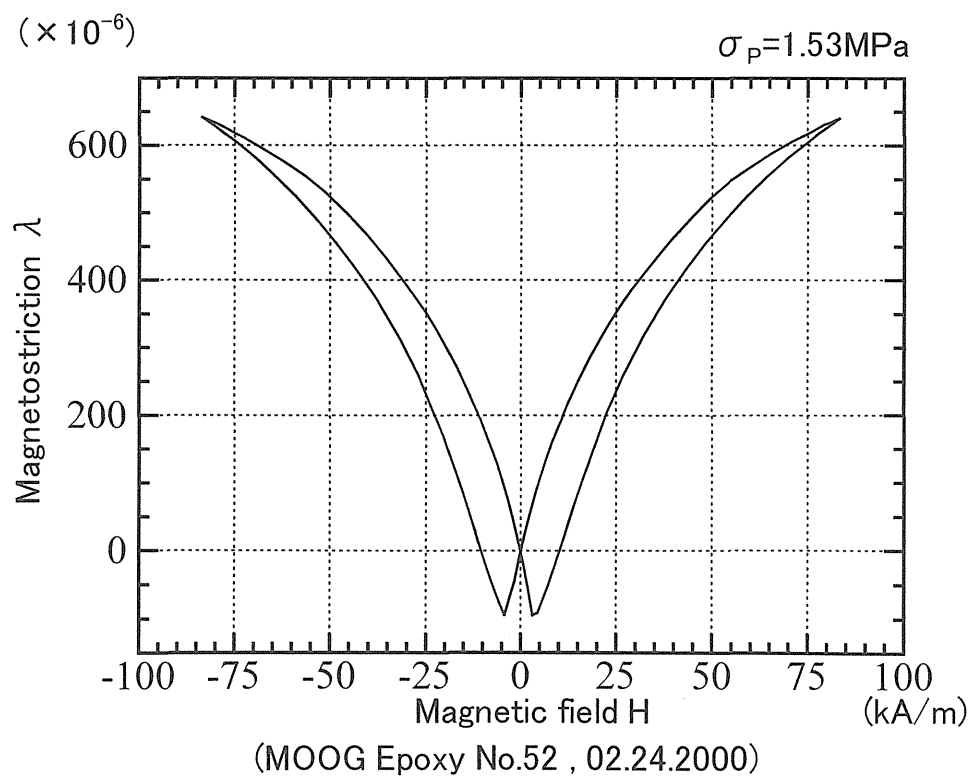
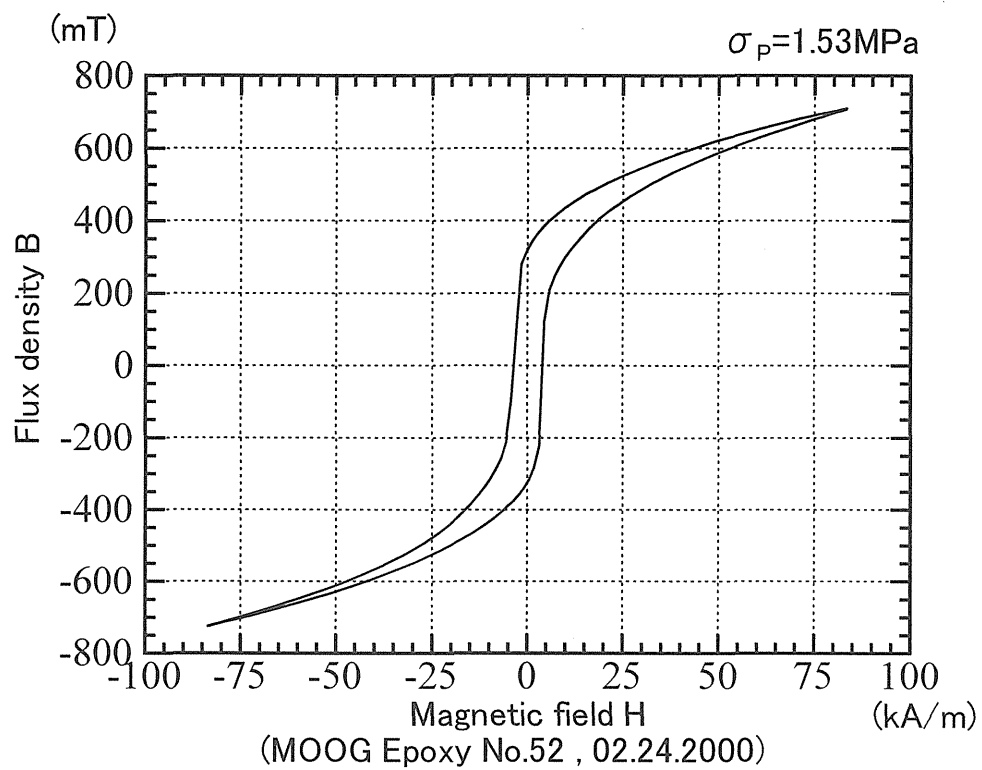


図 2-21 磁気特性、磁歪特性試験結果(No.52)

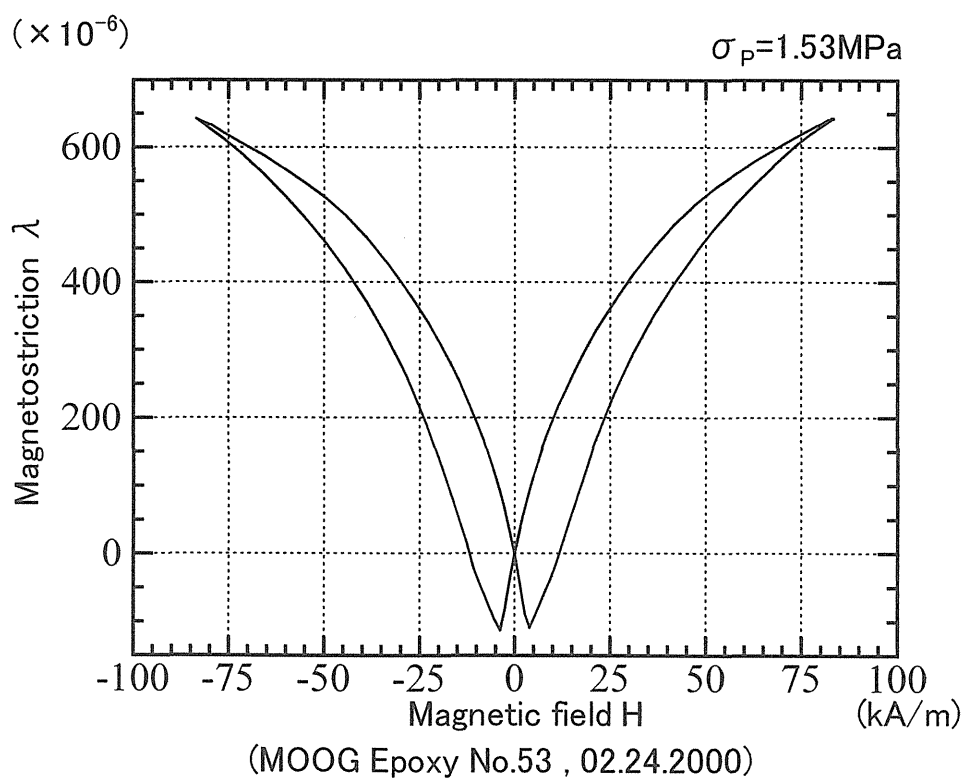
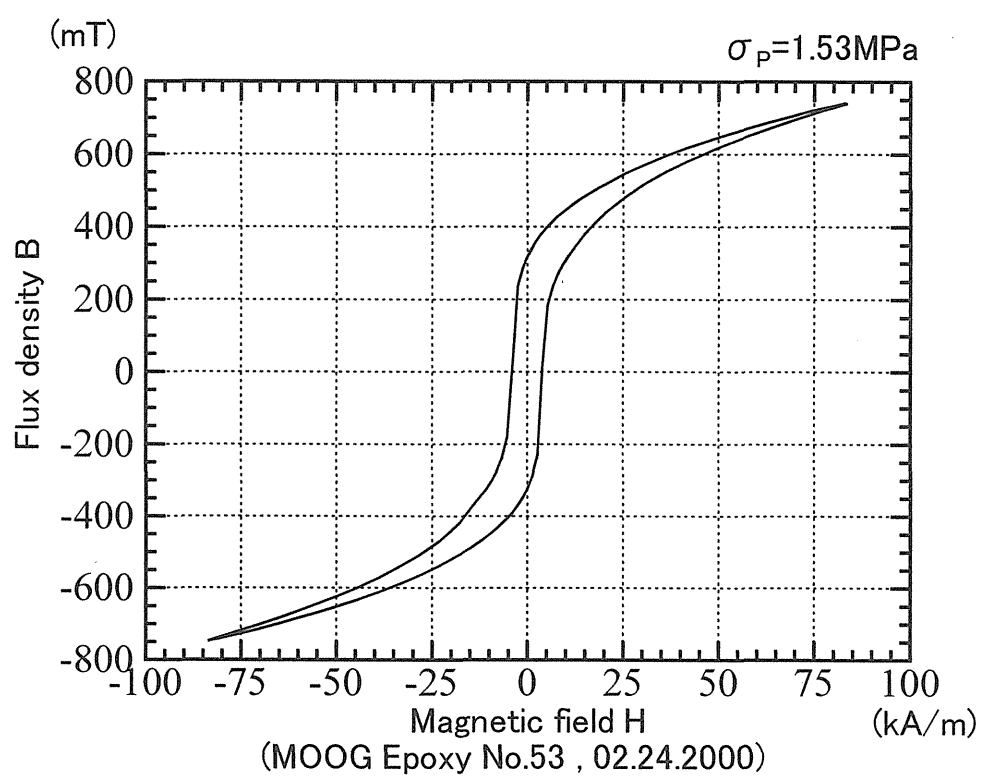


図 2-22 磁気特性、磁歪特性試験結果(No.53)

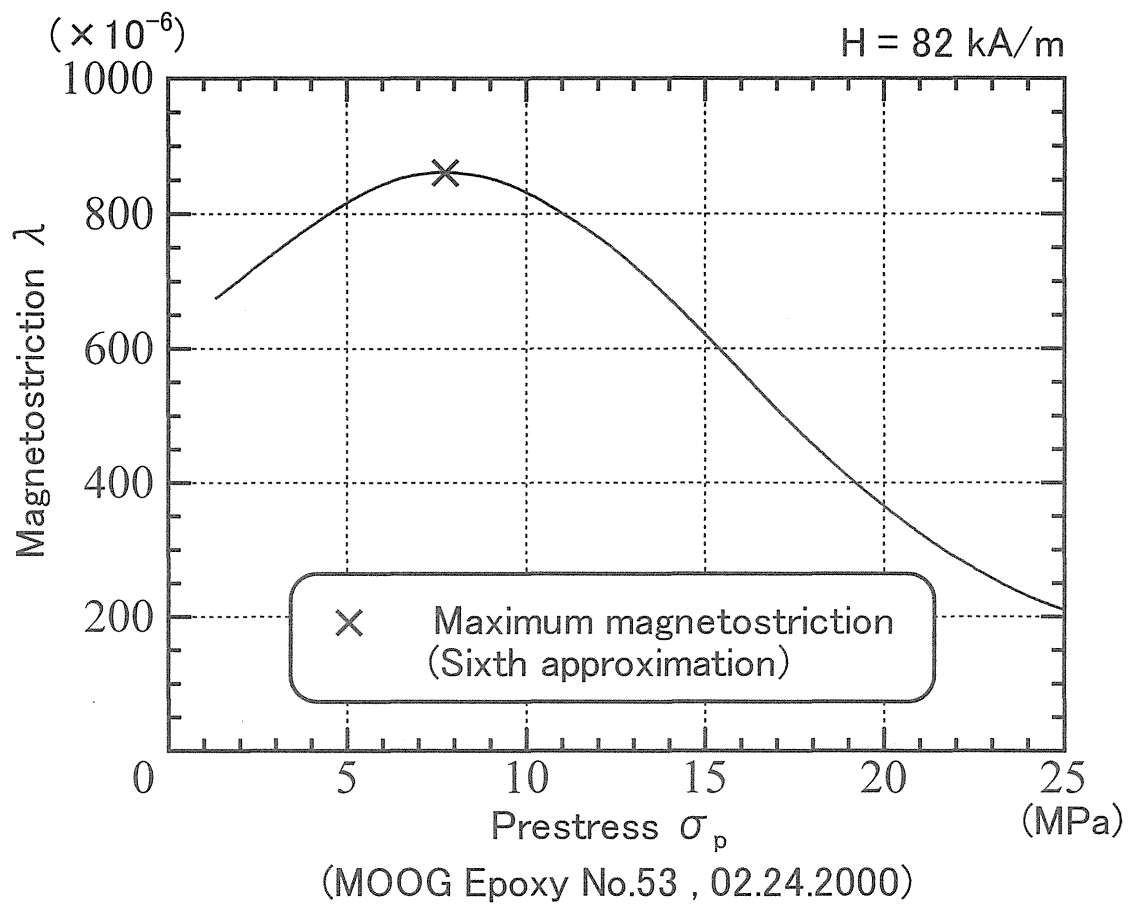


図 2-23 磁歪特性試験結果(プリストレスの影響)

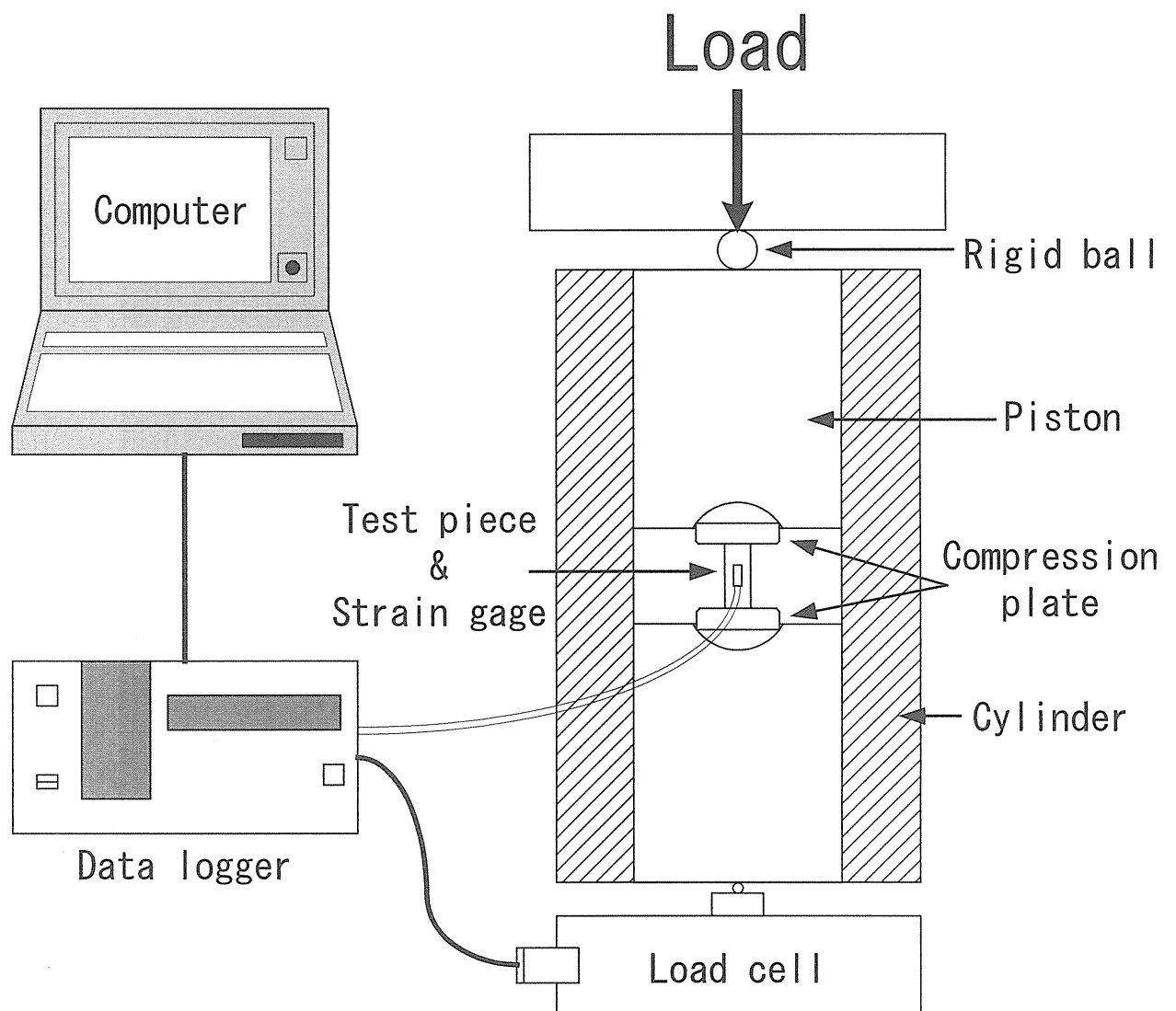
表 2-5 試験片寸法

試験片寸法

No.	外径(mm)				幅(mm)				軸長 (mm)	質量 (g)
	left	center	right	average	left	center	right	average		
1	3.554	3.509	3.501	3.521	3.382	3.391	3.393	3.389	30.05	2.1828
2	3.479	3.489	3.512	3.493	3.383	3.391	3.383	3.386	30.05	2.1604
3	3.560	3.531	3.546	3.546	3.394	3.410	3.411	3.405	30.10	2.1982
4	3.531	3.516	3.542	3.530	3.393	3.392	3.384	3.390	30.05	2.1898
5	3.459	3.432	3.459	3.450	3.397	3.402	3.417	3.405	30.00	2.1228
6	3.522	3.518	3.517	3.519	3.398	3.400	3.399	3.399	29.95	2.1845
7	3.486	3.464	3.455	3.468	3.352	3.346	3.345	3.348	29.90	2.1198
8	3.423	3.453	3.490	3.455	3.355	3.356	3.342	3.351	29.95	2.1091
9	3.434	3.447	3.493	3.458	3.380	3.383	3.383	3.382	29.95	2.1264
10	3.491	3.468	3.500	3.486	3.393	3.379	3.382	3.385	30.00	2.1491
11	3.457	3.440	3.488	3.462	3.371	3.384	3.385	3.380	30.00	2.1331
12	3.567	3.494	3.497	3.519	3.397	3.405	3.393	3.398	30.00	2.1625
13	3.513	3.495	3.478	3.495	3.386	3.394	3.402	3.394	30.00	2.1693
14	3.503	3.466	3.473	3.481	3.380	3.399	3.402	3.394	30.00	2.1425
15	3.502	3.470	3.498	3.490	3.388	3.384	3.372	3.381	30.00	2.1517
16	3.438	3.466	3.457	3.454	3.349	3.401	3.396	3.382	30.00	2.1465
17	3.439	3.488	3.504	3.477	3.332	3.401	3.393	3.375	30.00	2.1446
18	3.486	3.480	3.542	3.503	3.328	3.362	3.341	3.344	30.00	2.1673
19	3.591	3.536	3.520	3.549	3.386	3.396	3.392	3.391	30.05	2.1971

※ 外径（円形部分）および幅（平らな部分）はマイクロメーターで測定、軸長はノギスで測定、質量は電子天秤で計測。網掛け部分（外径の平均値=d）は圧縮応力 σ_c の算出に使用。 σ_c : 圧縮応力 (MPa)、g: 重力加速度 (m/s²)、p: 実荷重 (kgf)、d: 直径 (mm)

$$\sigma_c = \frac{4gp}{\pi d^2} = \frac{4 \times 9.80665 \times p}{\pi \times d^2}$$



Static compression test apparatus

图 2-24 静的压缩试验装置

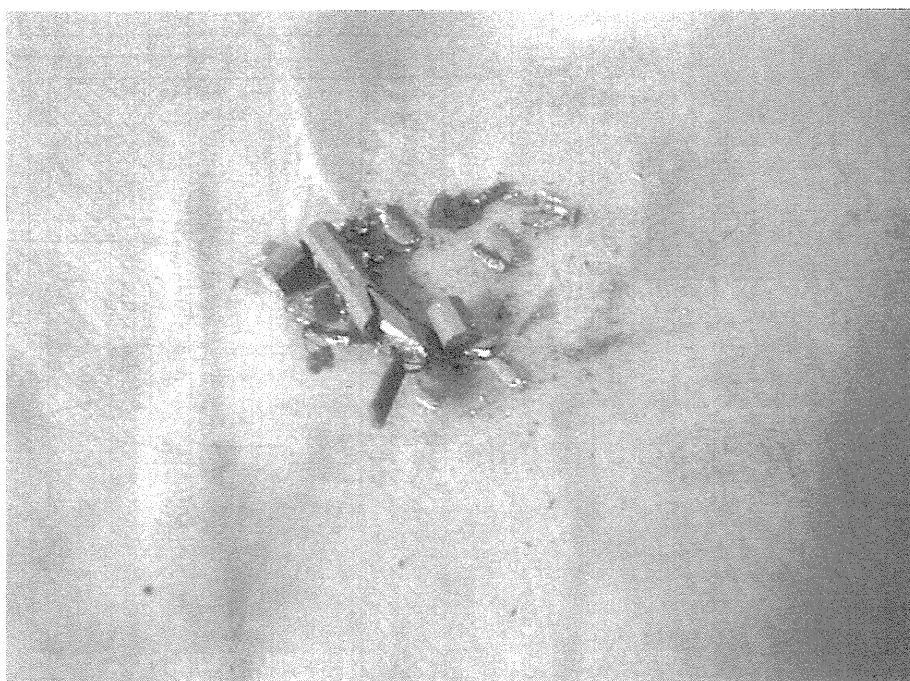
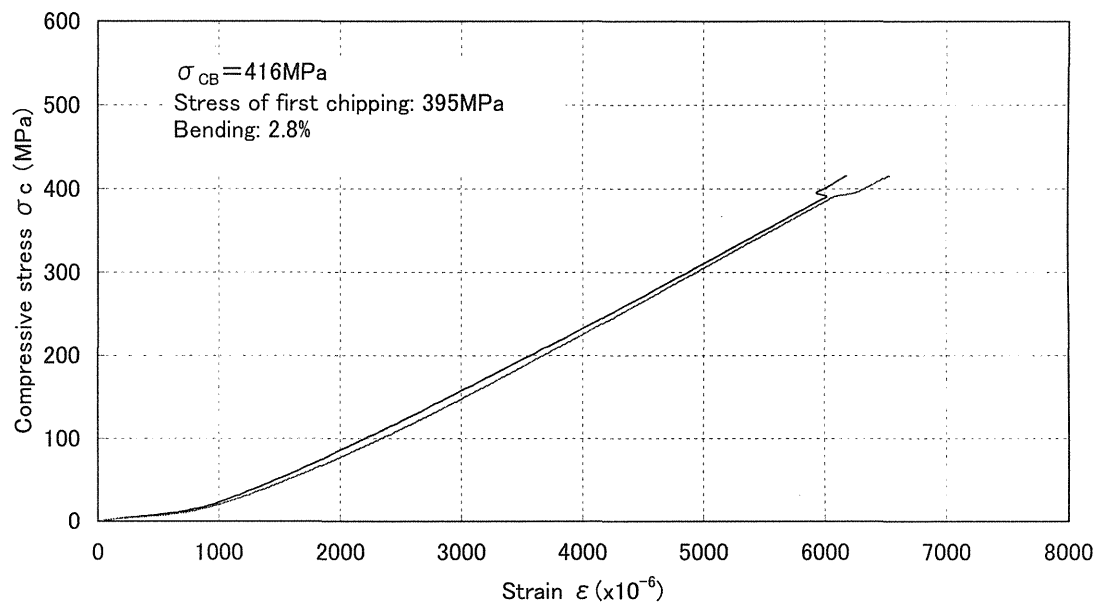
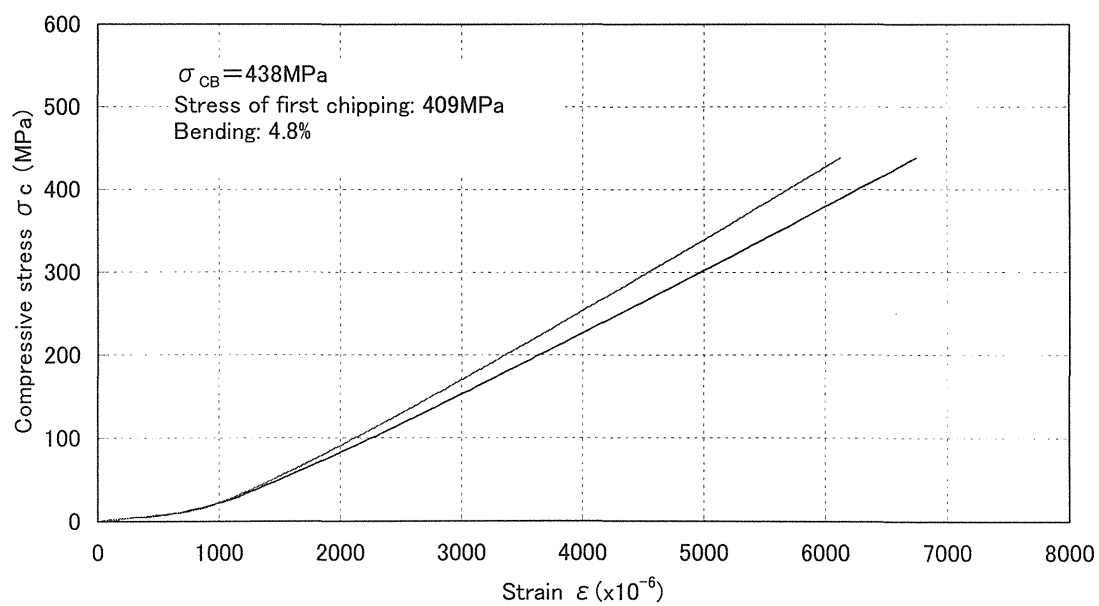


図 2-25 破壊後の超磁歪材料



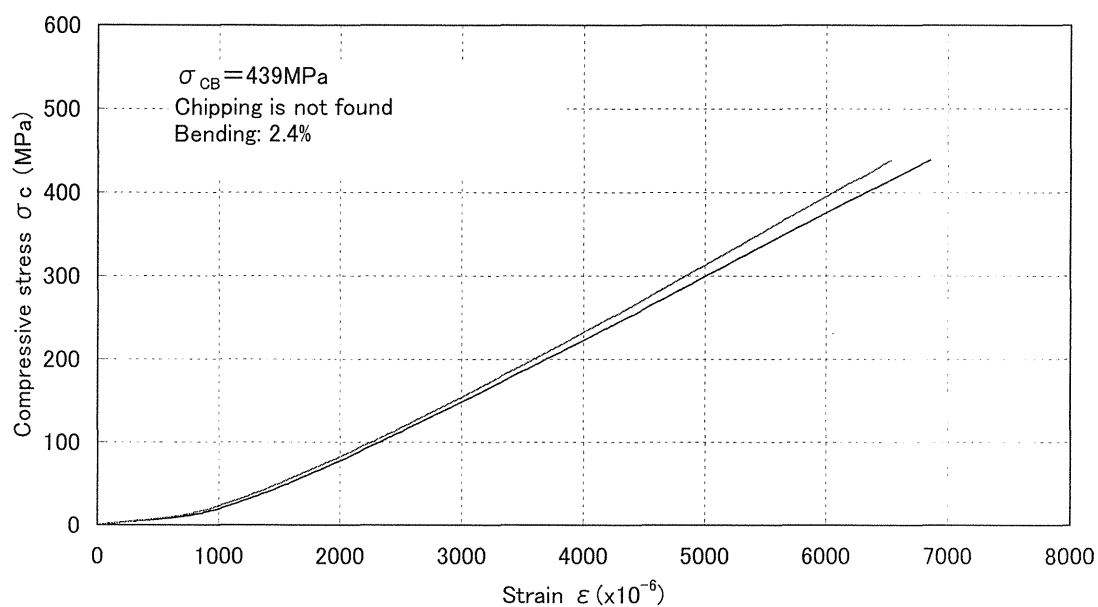
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.01, 10/11/1999)

図 2-26 圧縮強度試験結果(No.1)



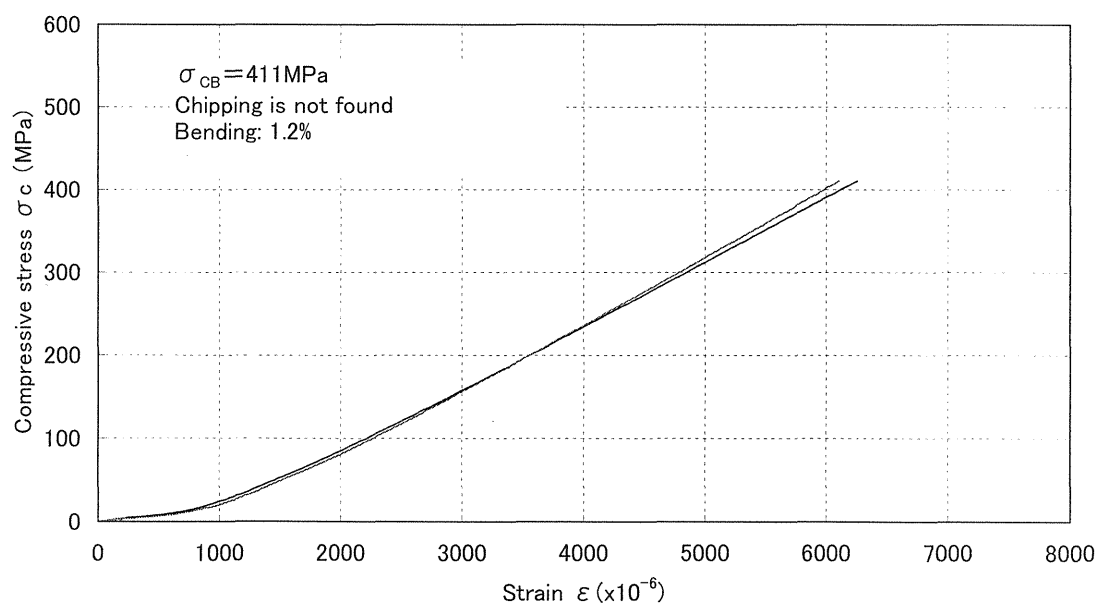
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.02, 10/12/1999)

図 2-27 圧縮強度試験結果(No.2)



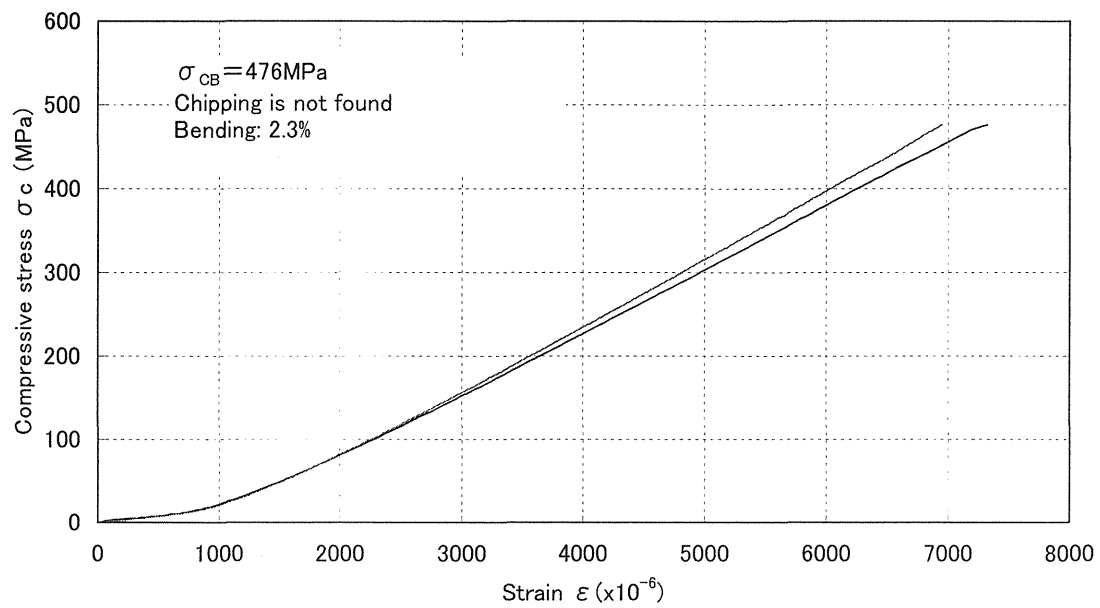
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.03, 10/13/1999)

図 2-28 圧縮強度試験結果(No.3)



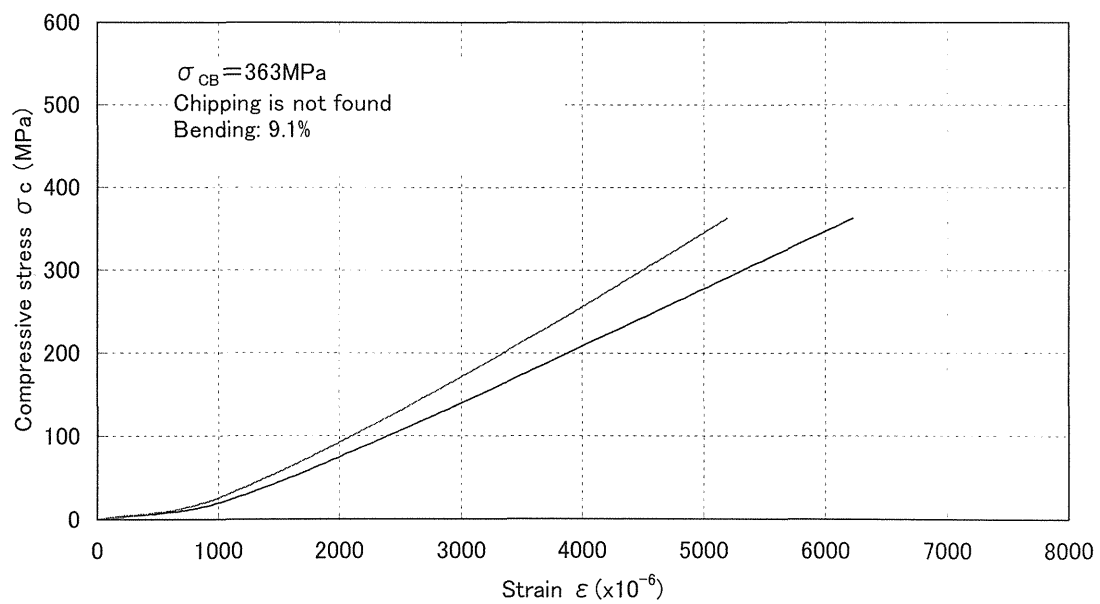
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.04, 10/13/1999)

図 2-29 圧縮強度試験結果(No.4)



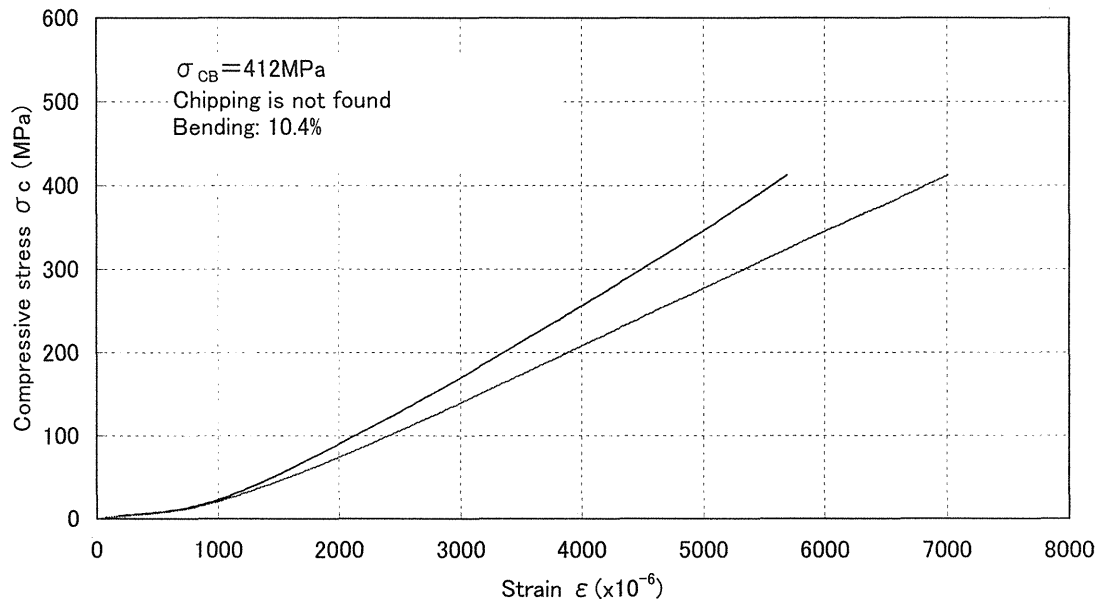
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.05, 10/14/1999)

図 2-30 圧縮強度試験結果(No.5)



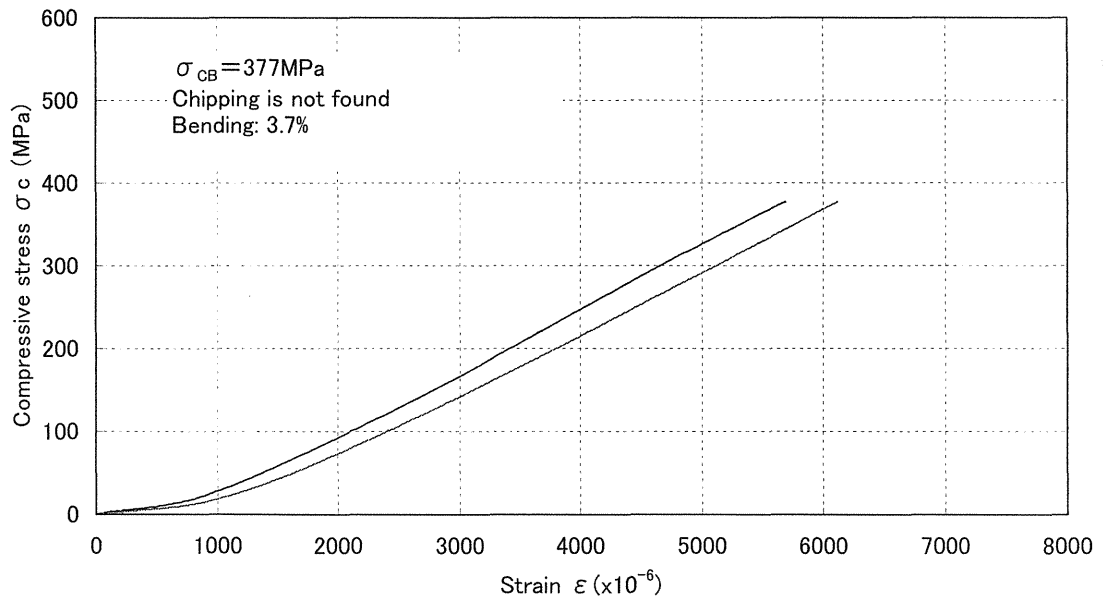
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.06, 10/18/1999)

図 2-31 圧縮強度試験結果(No.6)



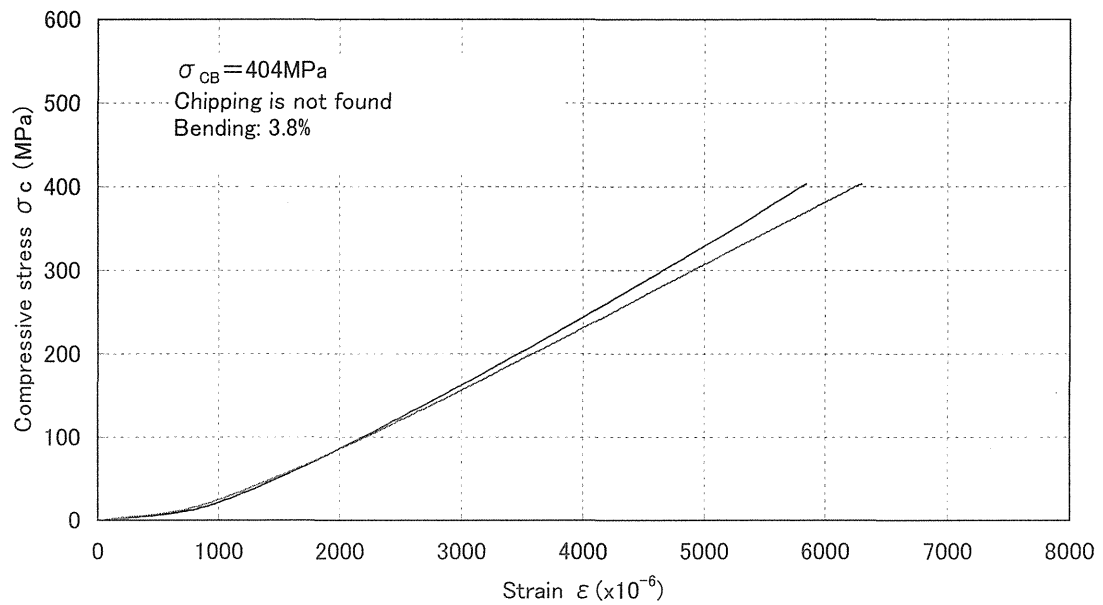
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.10, 10/19/1999)

図 2-32 圧縮強度試験結果(No.10)



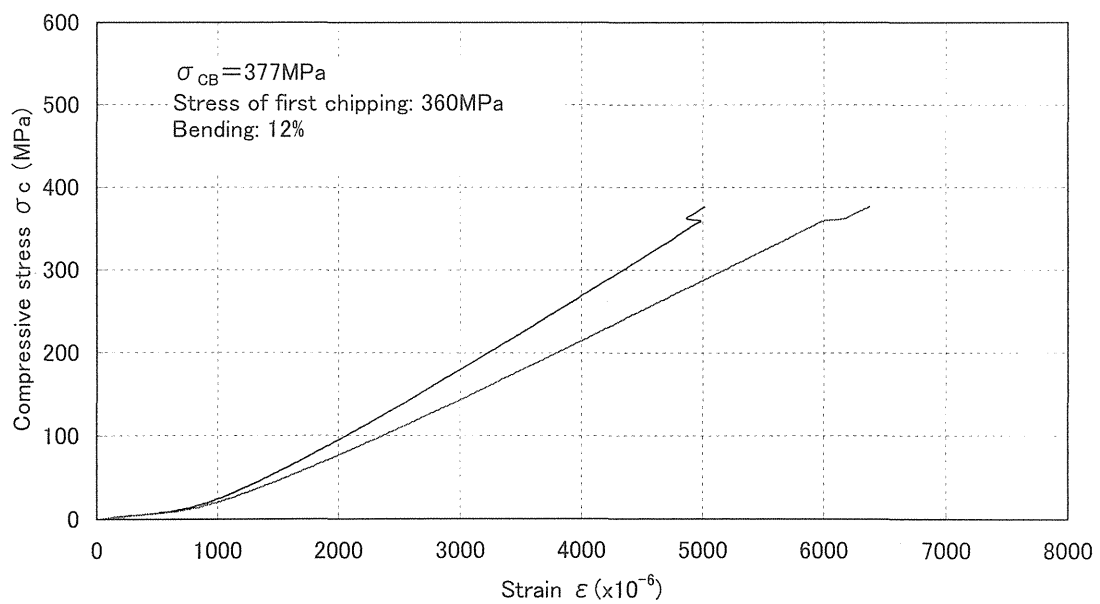
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.12, 10/19/1999)

図 2-33 圧縮強度試験結果(No.12)



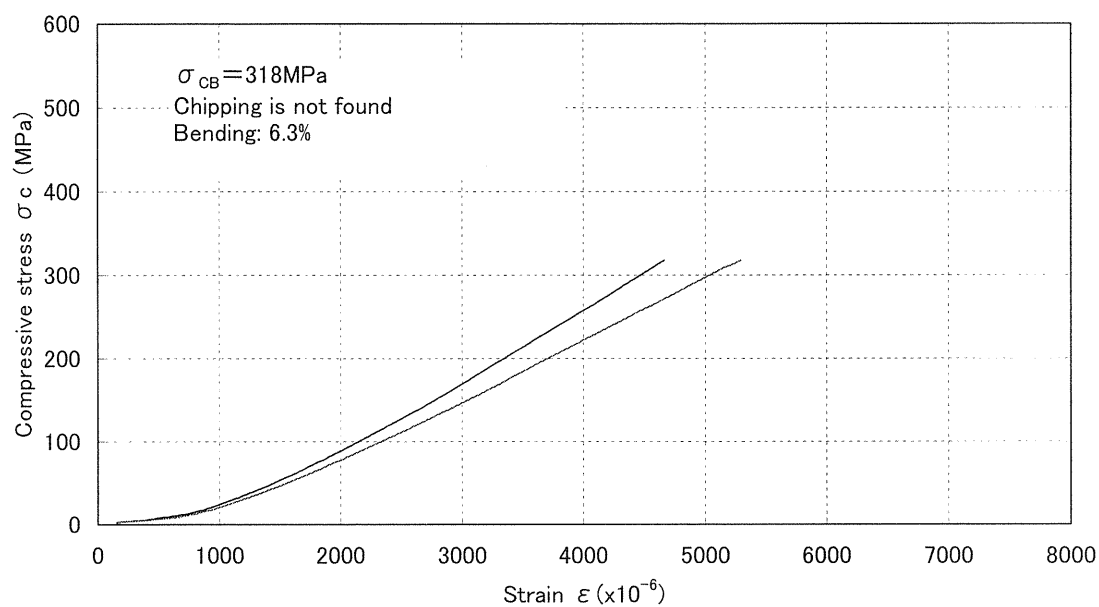
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.13, 10/21/1999)

図 2-34 圧縮強度試験結果(No.13)



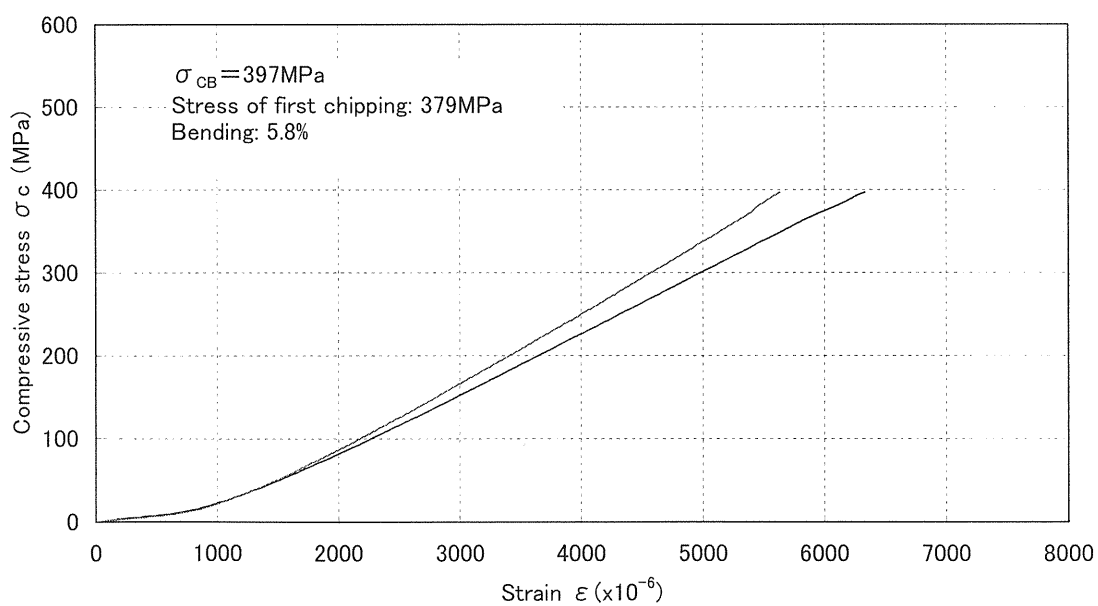
Stress-Strain diagram(Test piece: epoxy No.15, 10/24/1999)

図 2-35 圧縮強度試験結果(No.15)



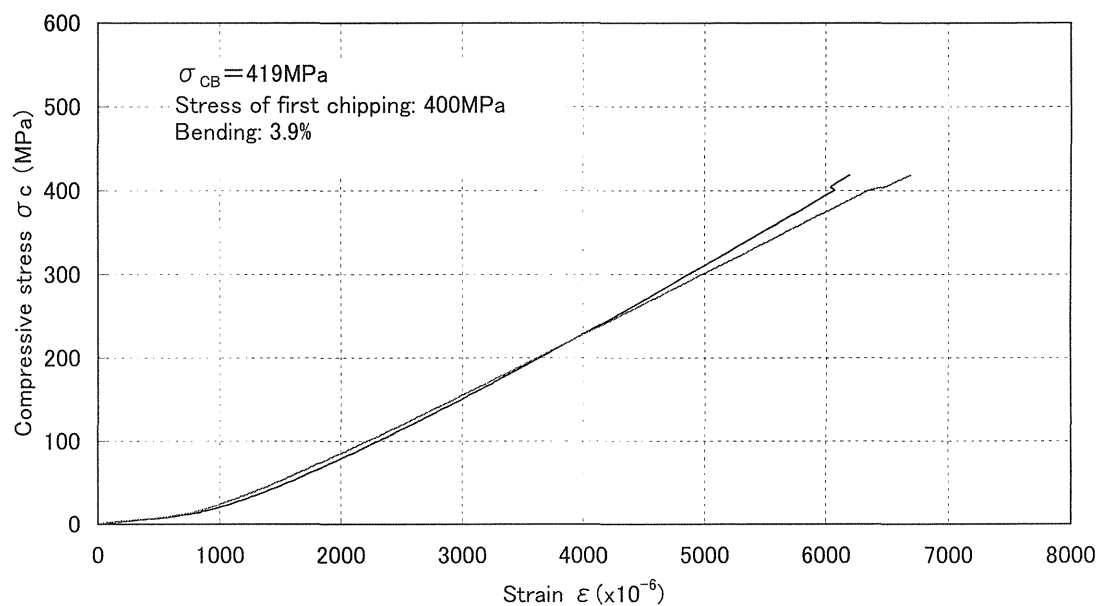
Stress-Strain diagram (Test piece: epoxy No.16, 10/24/1999)

図 2-36 圧縮強度試験結果(No.16)



Stress-Strain diagram (Test piece: epoxy No.18, 10/26/1999)

図 2-37 圧縮強度試験結果(No.18)

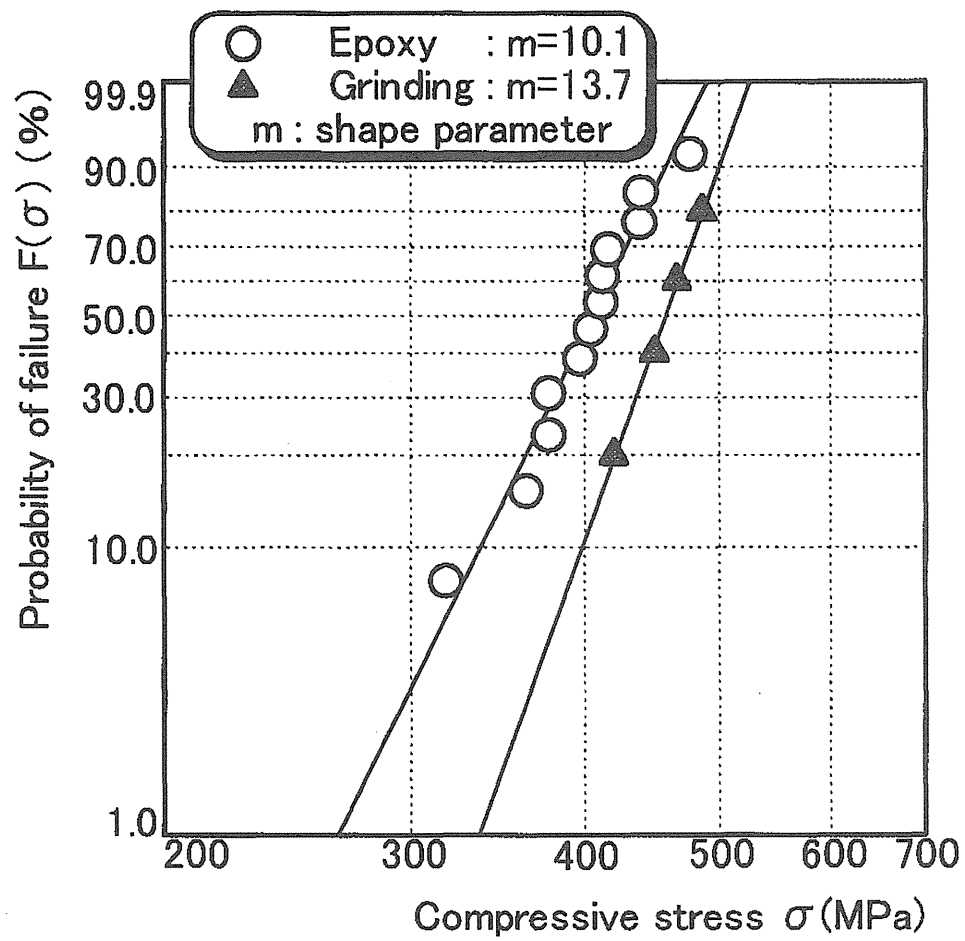


Stress-Strain diagram (Test piece: epoxy No.19, 10/28/1999)

図 2-38 圧縮強度試験結果(No.19)

表 2-6 圧縮強度試験結果

試験片 No.	破壊荷重 (kgf)	圧縮強度 (MPa)	チップング確認 応力 (MPa)	破壊時の曲げ (%)
Epoxy no.01	410	416	395	2.8
Epoxy no.02	428	438	409	4.8
Epoxy no.03	442	439	Not found(439)	2.4
Epoxy no.04	410	411	Not found(411)	1.2
Epoxy no.05	454	476	Not found(476)	2.3
Epoxy no.06	360	363	Not found(363)	9.1
Epoxy no.10	401	412	Not found(412)	10.4
Epoxy no.12	374	377	Not found(377)	3.7
Epoxy no.13	395	404	Not found(404)	3.8
Epoxy no.15	367	377	360	12.0
Epoxy no.16	304	318	Not found(318)	6.3
Epoxy no.18	390	397	379	5.8
Epoxy no.19	422	419	404	3.8
Average	397	404	396	
Standard deviation	39.5	39.4	38.9	



Weibull plots of compressive strength

図 2-39 ワイブルプロット

第 3 章

タンデム形超磁歪アクチュエータの 構造と特性

3・1 はじめに

前述の通り、超磁歪アクチュエータ構成は単純で（図 1-9）、容易にストロークを取り出すことが出来る。しかし、設計に当たっては下記の項目に注意する必要がある。

- ・ 熱膨張キャンセル
- ・ 適正プリストレス
- ・ 曲げモーメント回避
- ・ 最適磁気回路
- ・ コンパクト化

(1) 熱膨張

超磁歪アクチュエータの取り出せる変位は、超磁歪材料の磁歪そのものであるから、約 1500ppm、すなわち 1500×10^{-6} 程度である（表 1-1）。全長 100mm の材料であるとすれば $150 \mu\text{m}$ に過ぎない。一方材料の熱膨張係数は約 12ppm/°C であるから、100°C 変化で 1200ppm となり、実際の使用環境下では、駆動時の発熱も含め考えると、磁歪量にほぼ匹敵する熱膨張が生じる可能性が有る。従って、アクチュエータとしての温度ドリフトが無視できなくなり、温度調節機構を設計に取り込んだり（図 3-1）⁽³⁻¹⁾、変位等をフェードバック制御する工夫⁽³⁻²⁾が必要となる。しかし構造が複雑になったり、コストアップが生じるため、実用的ではない。アクチュエータ構造の中に、温度膨張をキャンセルする機構を持たせられると良い。

(2) プリストレス及び曲げモーメント

前章での試験結果の通り、適度なプリストレスを付加することで、磁歪量をかせぐことが出来る。プリストレスの付加には、ばねを用いるのが一般的だが、油圧、ボルト締込みによるもの、などでも可能である。しかし、超磁歪材料の強度特性は、前述の通り圧縮強度は大きい、引っ張り強度はそれの 1/20 以下程度と簡単に折れやすい。従ってアクチュエータに組み込む際及びプリストレスを付加する際には、材料に曲げモーメントがかからないように工夫する必要がある。

(3) 磁気回路

超磁歪材料の透磁率は空気の 8 倍程度と低いため、材料に磁場を効率よく付加できるよう磁気回路設計をする必要がある。また、コイルを使用するの磁場発生となるため、高速駆動にはソレノイド部の設計も工夫する必要がある。

(4) コンパクト化

さらに、前述の通り変位は高々 1500ppm 程度であるから、実用的な変位を得るにはどうしても全長が長くなるというハンデが有る。

以上のように、実用的な超磁歪アクチュエータ設計には上記工夫が必要であり、この当りの設計が進んでいないことが、超磁歪アクチュエータが広く用いられる際の障害となっているとも言える。

本章では、新提案のタンデム形超磁歪アクチュエータの設計内容とその性能を示す。

3・2 ストローク増幅機構

変位拡大機構の評価基準としては、エネルギー伝達効率 η と変位拡大率 n が考えられる。

$$\eta = (\text{変位拡大機構から取り出せる最大エネルギー}) / (\text{超磁歪材料から取り出せる最大エネルギー})$$

$$n = (\text{変位拡大機構先端の自由変位}) / (\text{超磁歪材料の自由変位})$$

変位拡大に伴い変位伝達の各構成部品においてエネルギー損失が生じる。エネルギー伝達効率は1に近く、変位拡大率は出来るだけ大きく出来る機構が理想である。しかしアクチュエータ出力は、拡大機能にエネルギー損失が無いとしても、変位拡大率の逆数に比例して低下するので、負荷に対し出力が足りなくなる可能性がある。設計に際しては、負荷条件と必要変位を考慮する必要がある。

変位増幅には下記のような機構があるが、それぞれ課題を持っている。

- ・レバー（てこ）式・・・弾性変形、慣性
- ・流体式（大小ピストン）・・・流体圧縮性、リーク、慣性
- ・積分式（摩擦駆動、油圧シリンダ）・・・応答性、耐久性
- ・流体式（大小ベローズ）・・・流体圧縮性、ベローズ変形異方性
- ・タンデム配置・・・ロッドのレイアウト、変位拡大率

(1) レバー式

これは、図3-2のように、てこの支点からの長さの比を変位拡大率として取り出す機構である（図3-3）⁽³⁻³⁾。圧電材料のインパクトプリンタヘッドなどが代表的例（図3-4）⁽³⁻⁴⁾である。構造は簡単で比較的小型化可能であるが、この機構の場合、ヒンジ部の弾性変形や、ベース部の剛性不足により、エネルギー伝達の低下及びそれに伴って変位拡大率も設計通りの値が得られないことが多い。また変位も支点を中心とした回転運動になってしまう。

(2) 流体式（大小ピストン）

これも良く用いられる機構である（図3-5、図3-6）。すなわちパスカルの原理により、変位を拡大する機構である⁽³⁻⁵⁾⁽³⁻⁶⁾。これも構成は簡単であるが、封入した流体の圧縮性、漏れ、シール部品の変形などに損失が考えられ、今回の超磁歪材料の場合は

出力できる変位が小さいため、損失に埋もれて変位拡大率が得られないことが多い。

(3) 積分式（摩擦駆動、油圧シリンダ）

これは摩擦駆動等による変位拡大である（図 3-7）。拡大率としては無限大が可能であるが、応答性や耐久性に問題がある。超音波モーターなどの応用例で利用は進んでいるが、エネルギー伝達効率の面では良くない。

(4) 流体式（大小ベローズ）

これもパスカルの原理を応用した一例である。密閉性が有り、漏れなどによるロスが生じないため、流体式としては有効と考えられる。本研究においても本形式による変位拡大を模索した。試作した超磁歪アクチュエータのストローク増幅部構造を図 3-8 に示す。リン青銅製の、径の異なる 2 つのベローズを同心状に設置し、内外 2 つの密閉容積を形造る。ストローク増幅をつかさどるのは、内側容積である。ここに液体を封入し、右側フランジ側断面積と左側小フランジ断面積との比でストロークを増幅する。右側フランジに超磁歪アクチュエータを接合し、右側フランジを動かし、その量を増幅して、左側小フランジストロークをとりだす。ここでの増幅量設計値は 5 倍である。内外ベローズ間の容積には、圧縮空気を封入する。これにより、超磁歪材料に与えるプリストレスを調整できる。すなわち、超磁歪材料に最適な圧縮荷重が負荷されるよう空気圧を調整する。今回、変位増幅部の封入液体には、体積弾性係数の大きい水グリコール系作動油を用い、プリストレスによる流体の圧縮を出来るだけ防ぐよう工夫した。

本アクチュエータの変位特性を図 3-9 に示す。最大ストローク $164\mu\text{m}$ がえられ、増幅率は $4.7 (=164/35)$ である。設計値との差は、ベローズが半径方向に変形することによる機械的ロスによるもの、及び封入した流体の体積変化によるものと考えられる。周波数応答特性（図 3-11）は、 300Hz あたりにピークを持ち、過渡応答特性においてもオーバーシュートが大きい（図 3-10）。このままの特性では高速かつ微少位置決め用アクチュエータとしては、使いにくい。ダンピング対策が必要であることが分かった。

まず、ピークの原因がどこにあるのか調査するため、コンピュータによる構造解析（ANSYS）を行った（図 3-12）。機械的共振点としては、ベローズ自身のサージとベローズ／フランジばね質量系によるものの 2 つが考えられる。その 2 つについてシミュレーションした結果、サージは 1000Hz 以上、ばね質量系は 270Hz を得た。これより約 300Hz のピークはベローズ／フランジばね質量系にあることが分かった。

機械構造的対策で共振点を 1000Hz 以上に動かすには、フランジ質量を小さくするか、ベローズばね剛性を上げるかであるが、現状の設計をベースに大きくピーク点をずらすのは、不可能である。そこでダンピングを電気回路的にとることとした。手法としては、

（1）極配置法（2）速度フィードバック制御、の 2 つを試みたが、ここでは効果の大きかった（2）の速度フィードバック制御の結果を報告する。

センサによる位置信号を微分し、フィードバックすることでダンピングをとった。過渡応答及び周波数応答特性を図 3-13 及び図 3-14 に示す。これより、ほぼピークを除

去で、オーバーシュートも生じない特性が得られた。

以上より、ベローズを用いた変位拡大機構は、拡大率には損失が有り、アクチュエータとしてのダンピング特性も悪い。5 倍程度の変位拡大により、力は $1/5$ となっており、負荷に影響されやすい。構造も複雑でコスト高も否めない。そこで、増幅機構の最後に挙げたタンデム配置による変位拡大法を具体的に実施する方法を考えることとした。

3・3 タンデム形超磁歪アクチュエータの構造

図 3-15 にタンデム形超磁歪アクチュエータの構造を示す。基本構造は一般の超磁歪アクチュエータと同じで、磁界を発生するコイル、磁気バイアスを与えるマグネット、磁気回路を形成するヨーク、プリストレスを与える皿ばねからなる。

小型化は、超磁歪材料をコイル内に一括して組むことにより実施した。図 3-16、17 にその方法を示す。Z 形のホルダーに対し図のように 2 本の超磁歪材料を配置する。コイルに電流を流す事で磁界が発生し、GMM-1/GMM-2 共に伸びを生ずる。GMM-1 の伸びは、Z 形ホルダーを介して GMM-2 そのものを移動させる。従ってアクチュエータストロークとしては、GMM-1、GMM-2 の伸びを加算したものとなる。このように、Z 形ホルダーを用いて 2 本の超磁歪材料をタンデムに設置する方法により、今までのアクチュエータに対し約半分の長さで同レベルのストローク量が得られる。

またホルダーは、熱膨張による位置変動を抑える機構を兼ねている。すなわち、温度上昇により超磁歪材料の熱膨張するが、ホルダーがそれに見合う熱膨張をすることで、アクチュエータとしての熱による位置変動を抑える事が出来る。今回はチューブ材質とその長さを調整することで上記機能を達成した。その結果、材料をリン青銅を選ぶことで温度ドリフトとして、 $20\sim 80^{\circ}\text{C}$ 範囲で $3\mu\text{m}$ に押さえることが出来た。

またこの構造では、変位拡大による出力の低下も発生せず、超磁歪材料の出力はそのままロス無く取り出せる構造である。すなわち、変位伝達部品のホルダーの剛性が高い設計とすることで、伝達ロス（機械的ロス）を発生させない設計にしている。

今回使用した超磁歪材料寸法は、直径 3.5mm 長さ 30mm であり、3 本を 1 セットとした 2 セットの超磁歪材料を用いている。タンデム設置により全長 60mm の超磁歪材料を使用したと同一と考えられる。入力電流を上げることで、 60mm の約 0.1% のストローク量が得られることも確認済みで、磁気回路的にも問題のないことがわかった。また 3 本 1 セットで用いることで、プリストレスや外部からの負荷に対し、超磁歪材料に曲げモーメントが負荷されるのを、極力押さえられる構造となっている。本構造での試験中に、超磁歪材料が破壊した例はなく、環境試験として 50G の振動試験も実施したが、全く機能の劣化、破壊は見られていない。堅牢で、信頼性の高い構造と言える。

アクチュエータの最大発生力は、変位を固定した状態で測定したところ、80kA/m の磁界負荷にて約 560N であった。微少変位制御アクチュエータとしては大きな発生力で、外乱等の負荷に強いアクチュエータと言える。

3・4 静特性と周波数特性

今回開発したアクチュエータの変位特性を図 3-18 に示す。4A 入力にて約 40 μ m のストロークが得られている。GMM-1 のみによるストロークを計ったところ約 20 μ m であったことから、本機構による機械的ロスはないことが確認された。過渡応答及び周波数応答特性の試験結果（図 3-19、20）から、応答は 1ms 以内と速く、静定性は良い。オーバーシュートはわずかながら存在するが、ベロースによる変位拡大機構ほどではなく、使用上許容範囲である。周波数応答から、このアクチュエータの機械的固有振動数は約 1.4KHz、90° 位相遅れ点は約 1KHz である。応答的には十分な結果が得られた（表 3-1）。

3・5 アクチュエータ強度特性

今回設計したアクチュエータの強度特性を調査した。

供試材寸法を表 3-2 に、実験装置構成及び装置写真を図 3-21～22 に示す。実験装置は超磁歪材料単体での圧縮強度試験で用いたものと同等で、試験片部に、ホルダーに超磁歪材料を 6 本装着した状態での圧縮強度試験を行った。荷重はロードセルにより検出し、破壊直前の圧縮荷重を圧縮強度とした。

結果を表 3-3 に示す。圧縮強度の平均値は 105N となり、これは超磁歪材料 1 本での圧縮強度 40.5N の約 2.6 倍の値となった。理論的には、3 本 1 セットのしようであるから、3 倍の圧縮強度が期待される。超磁歪材料のホルダーに差し込んだ方の端面から破壊（チップング）が生じており（図 3-23）、3 倍の強度が得られなかった理由は、

- (1) ホルダーの挿入穴底加工精度（直角度）が良くない。
- (2) 3 本の挿入穴の深さが不均一なため、材料に曲げモーメントがかかった。

ことが考えられる。

第3章参考文献

- (3-1) 江田、小野間、佐橋、小林、超磁歪アクチュエータに関する研究、精密工学会誌、57-3 (1991)、445-452
- (3-2) 藤田、下徳、藤本、片山、小林、酒井、超磁歪アクチュエータを用いたアクティブ微震動制御に関する基礎的研究、日本機械学会論文集 C,6-0571 (1994)、811-817
- (3-3) 矢野、圧電素子の振幅拡大機構、精密工学会春季講演論文集 (1991)、225
- (3-4) 中村、水谷、超磁歪材料とその応用、住友軽金属技報、32-3 (1991)、62-69
- (3-5) 村田、川瀬、小川、脇若、山田、超磁歪材料の大推力アクチュエータへの適用検討、第9回電磁力関連シンポジウム講演論文集 (1997)、3-6
- (3-6) 佐藤、田中、超磁歪素子を用いた PWM 制御高速電磁弁の開発、平成5年秋季油空圧講演会講演論文集 (1993)、33-36

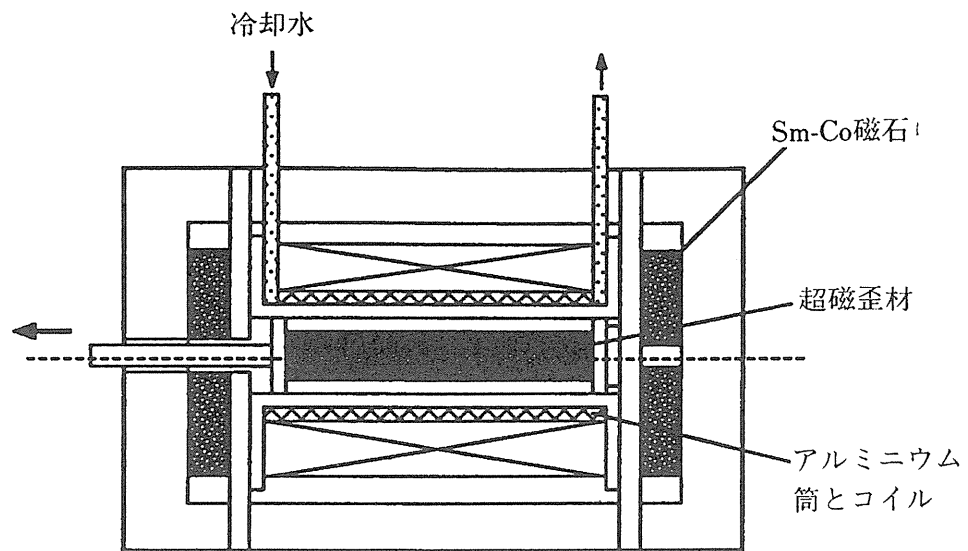


図 3-1 強制冷却制御による超磁歪アクチュエータ

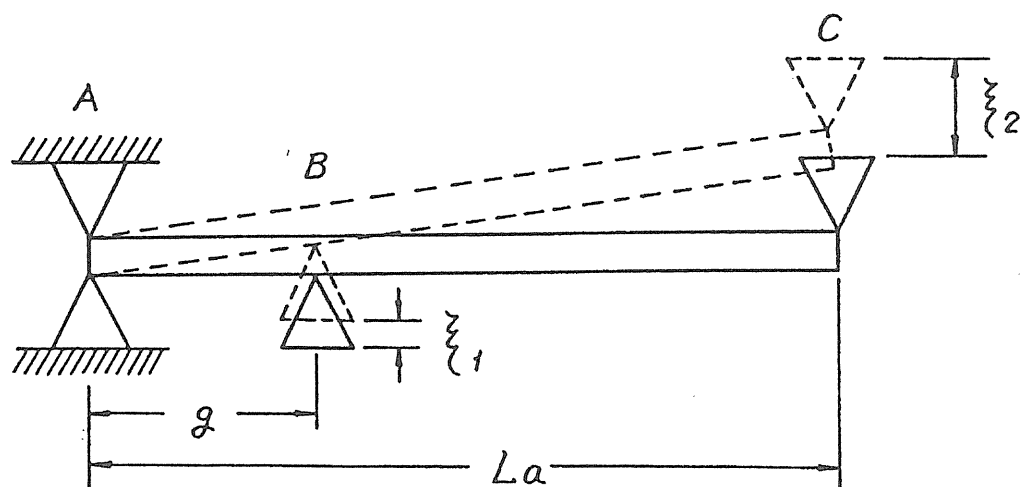


図 3-2 レバー式変位増幅

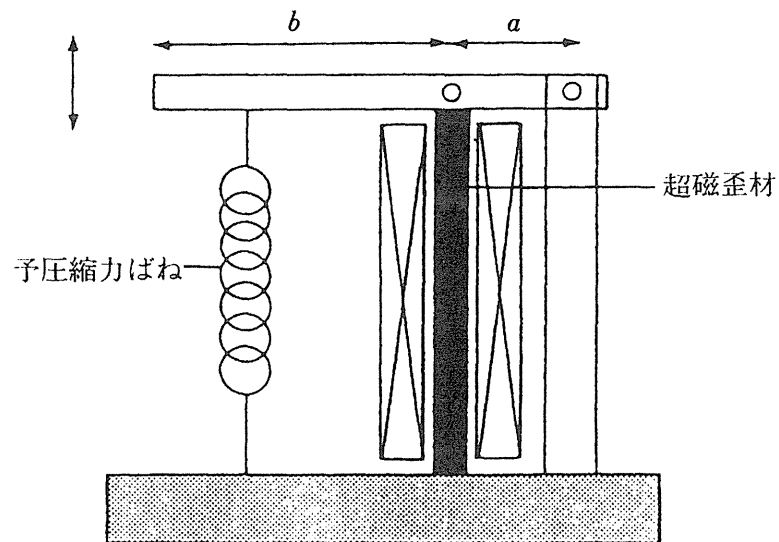
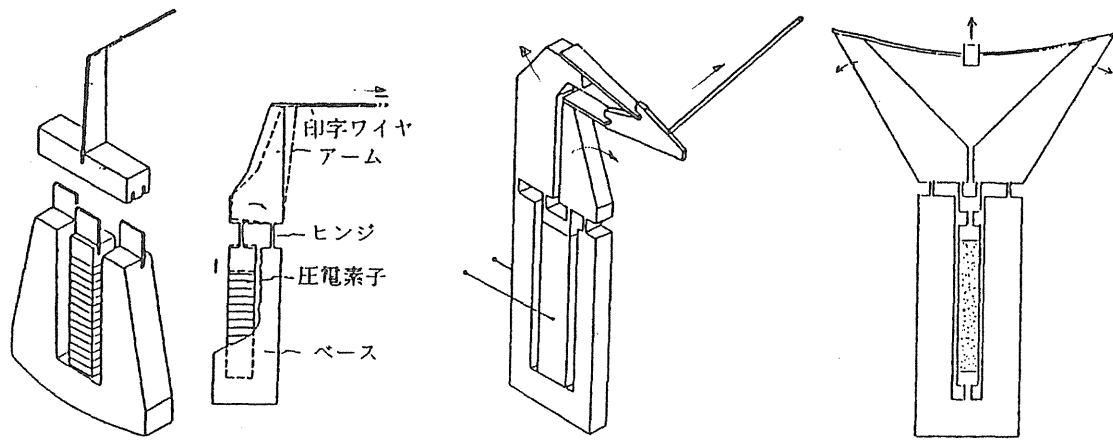


図 3-3 レバー式変位拡大機構（超磁歪アクチュエータ）



(a) 1 段変位拡大機構 (b) 差動型 2 段変位拡大機構 (c) 座屈ばね利用変位拡大機構

図 3-4 インパクトプリントヘッド

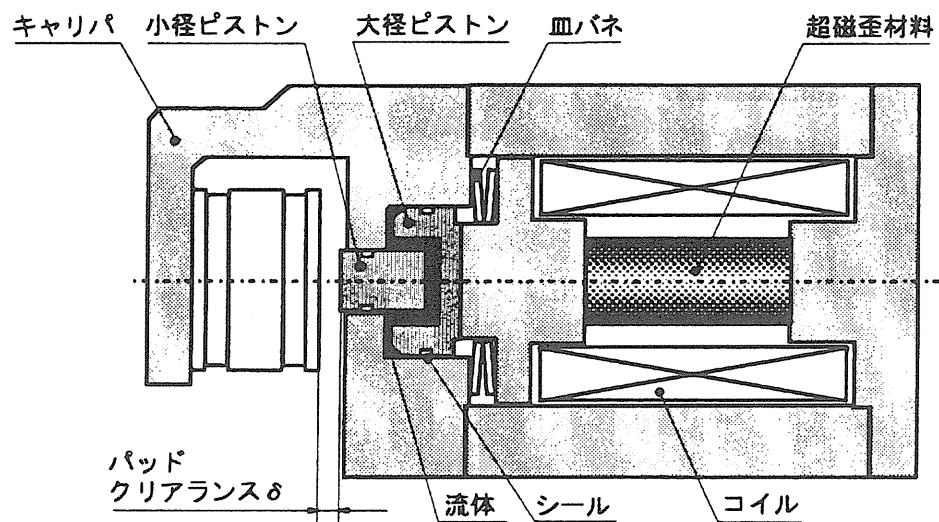


図 3-5 流体式変位拡大機構例（超磁歪ブレーキ）

Valve stroke : 0.25mm
Max. flow rate : 8l/min at 7MPa

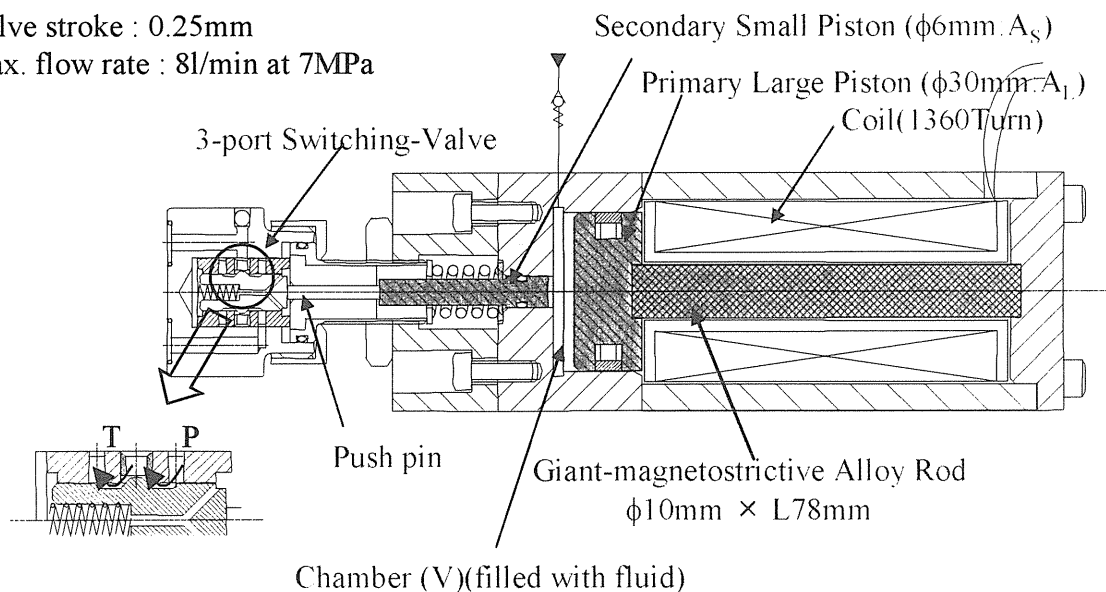


図 3-6 流体式変位拡大機構例（超磁歪駆動高速電磁弁）

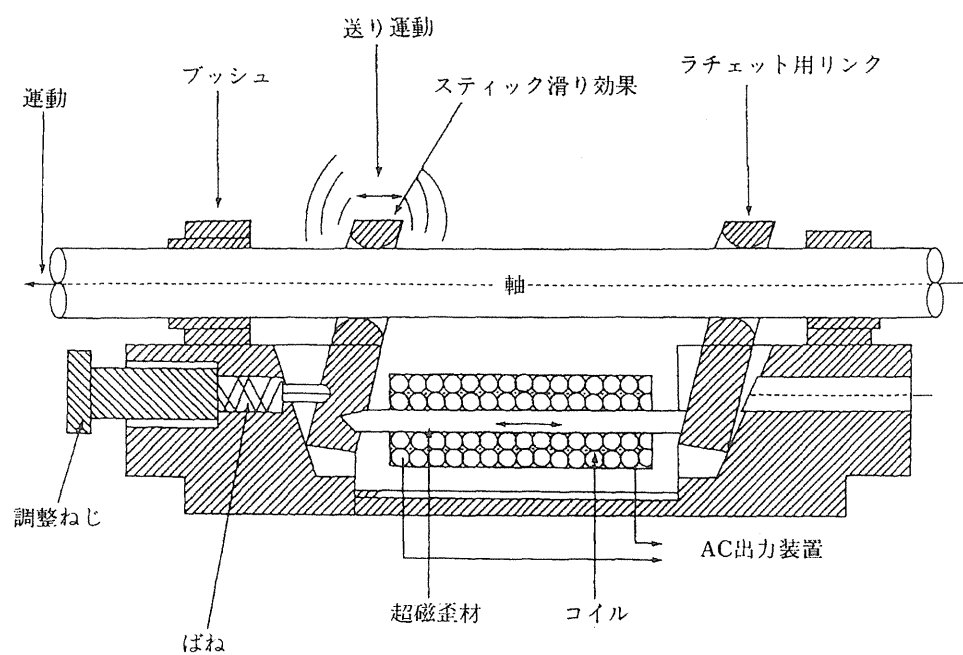


図 3-7 積分式変位拡大機構例 (工具送りデバイス)

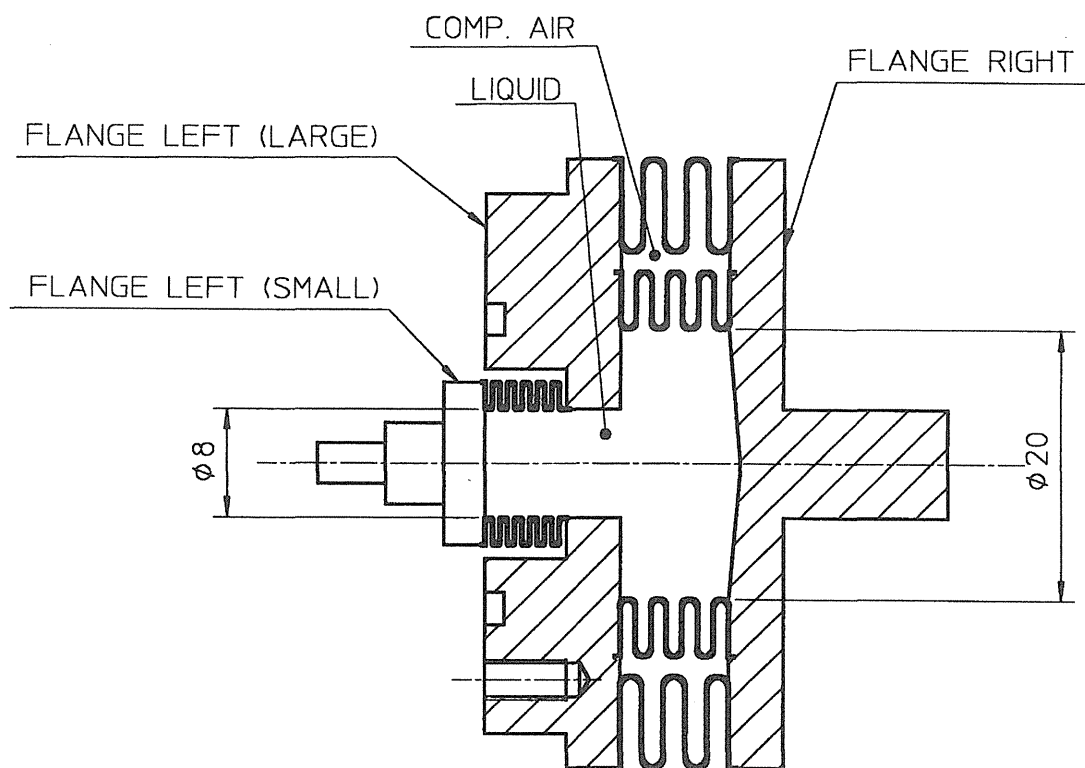


図 3-8 大小ベローズによる変位拡大機構

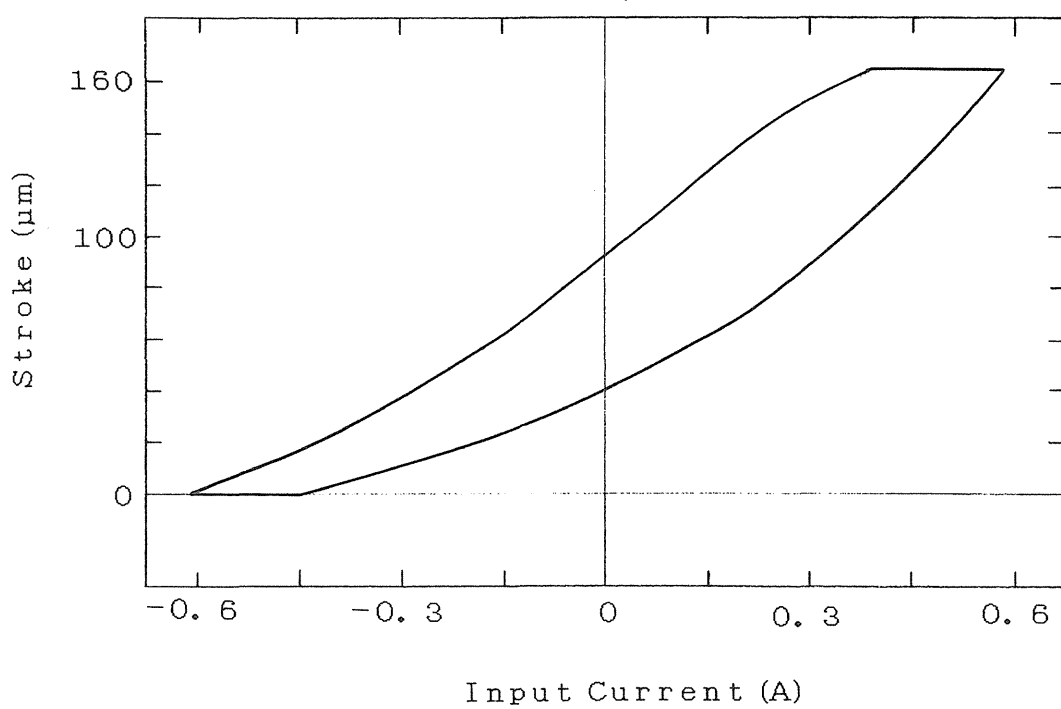


図 3-9 変位特性 (ベローズ変位拡大超磁歪アクチュエータ)

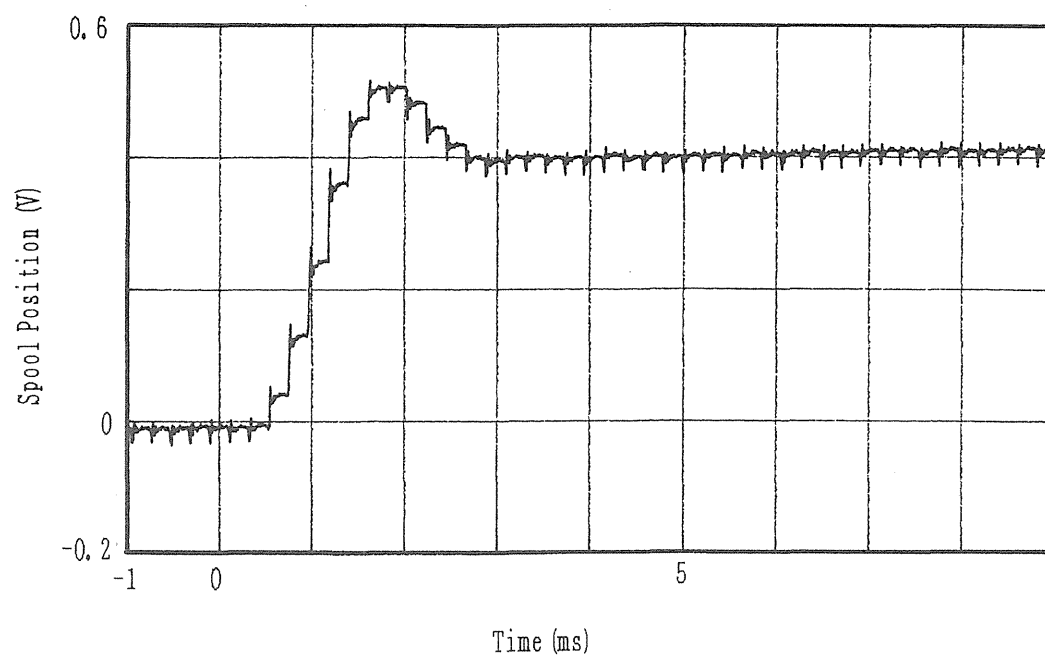


図 3-10 過渡応答特性（ベローズ変位拡大超磁歪アクチュエータ）

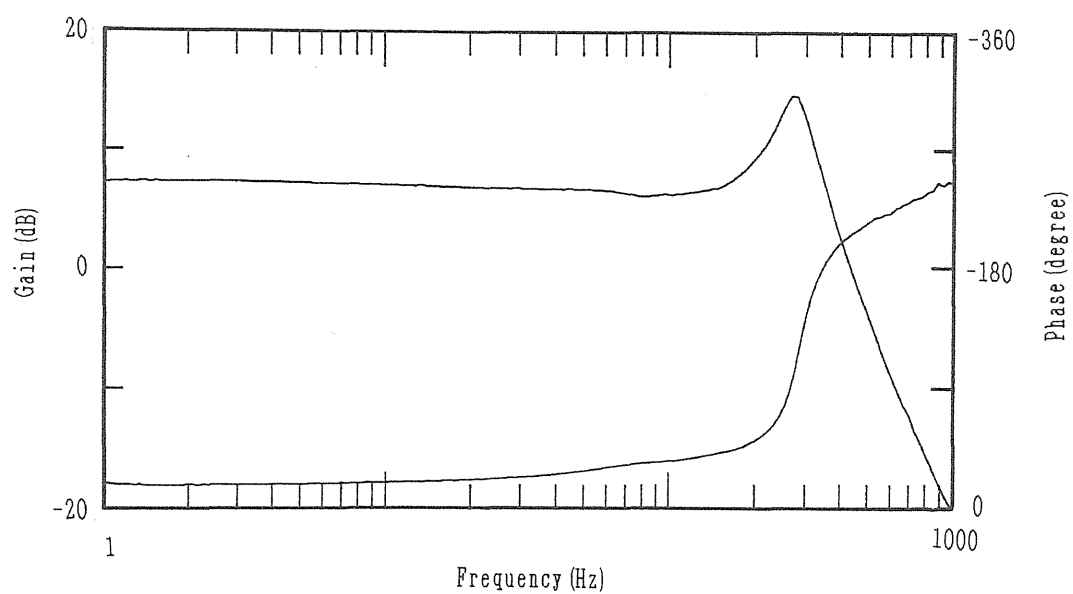


図 3-11 周波数応答特性（ベローズ変位拡大超磁歪アクチュエータ）

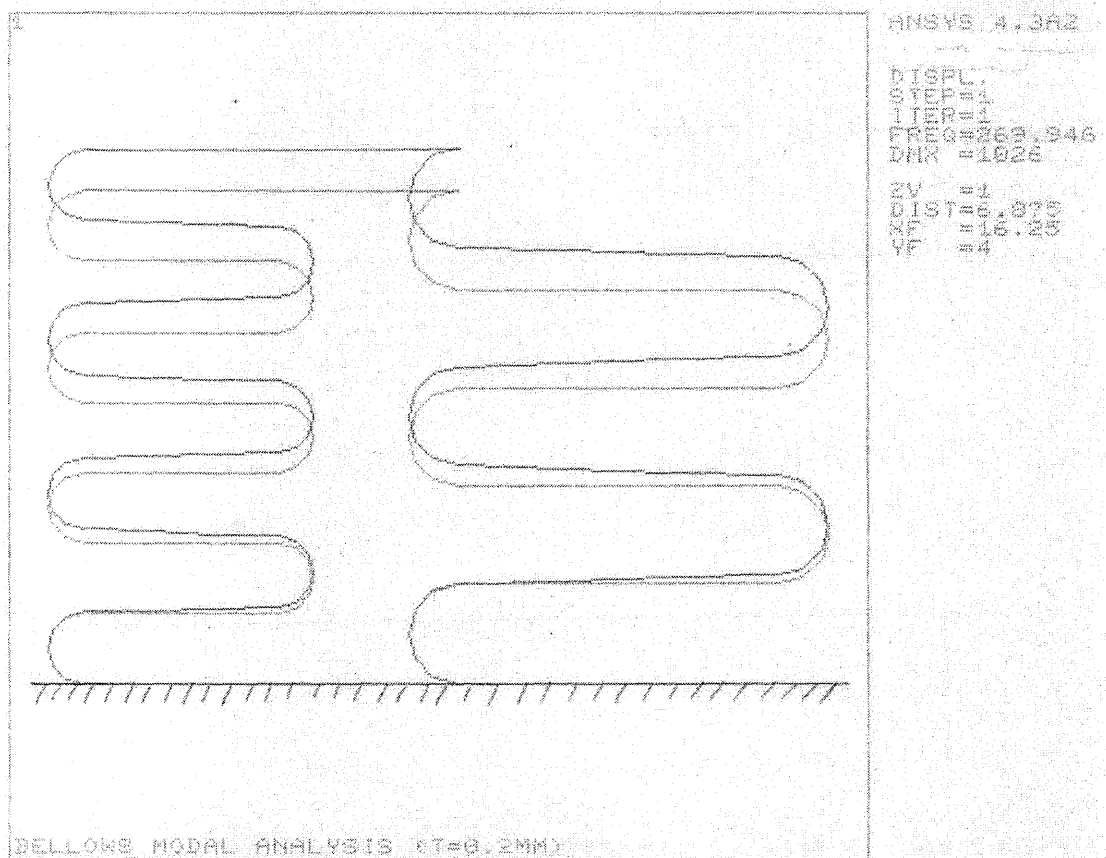


図 3-12 ベローズ固有値解析

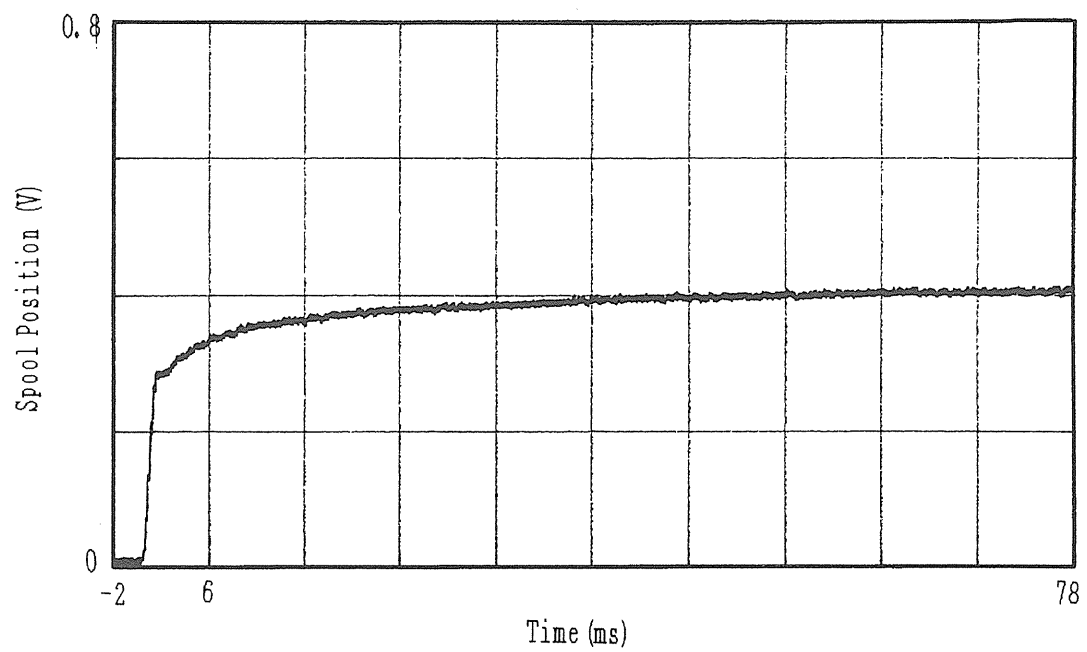


図 3-13 過渡応答特性 (速度フィードバック、ベローズ変位拡大超磁歪アクチュエータ)

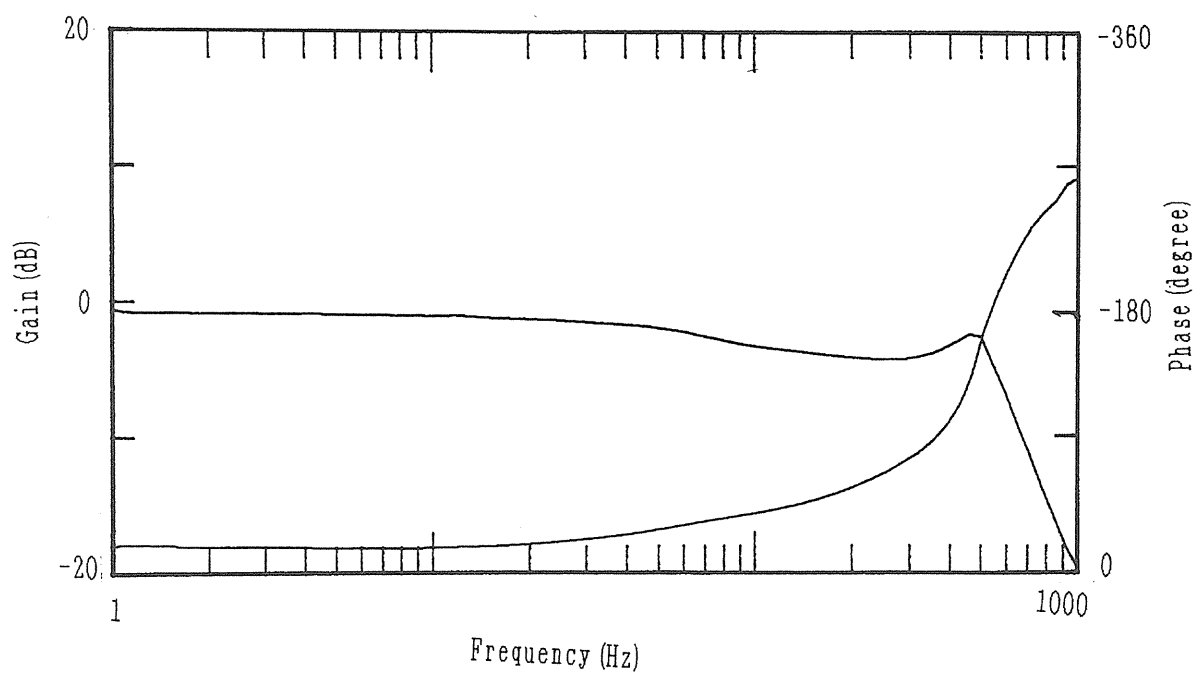


図 3-14 周波数応答特性 (速度フィードバック、ベローズ変位拡大超磁歪アクチュエータ)

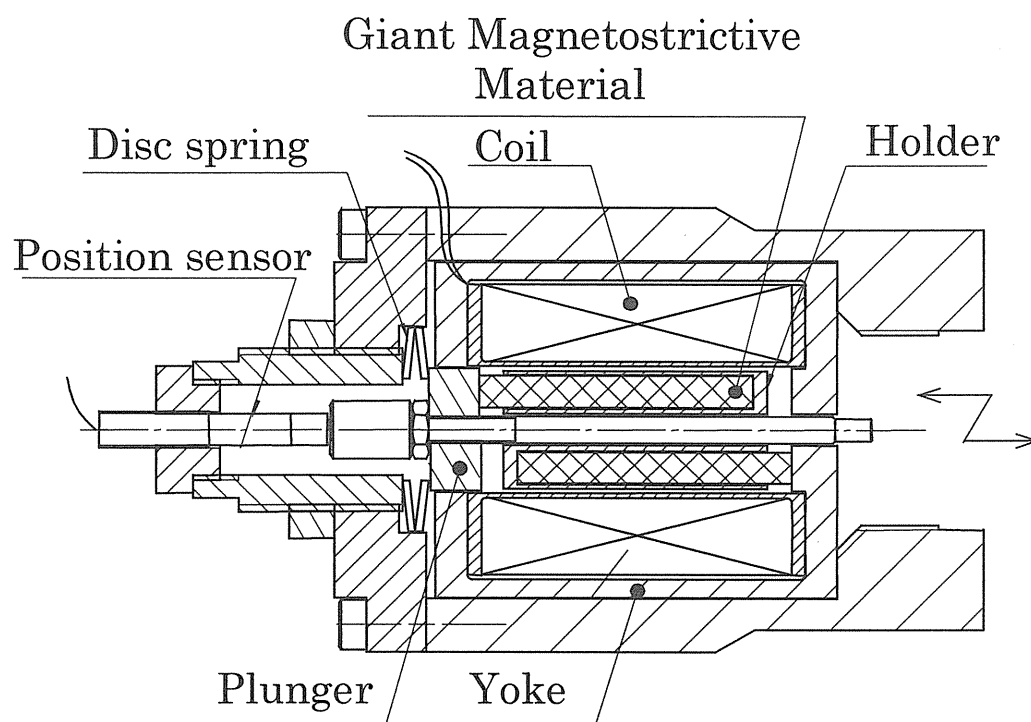


図 3-15 タンデム形超磁歪アクチュエータ

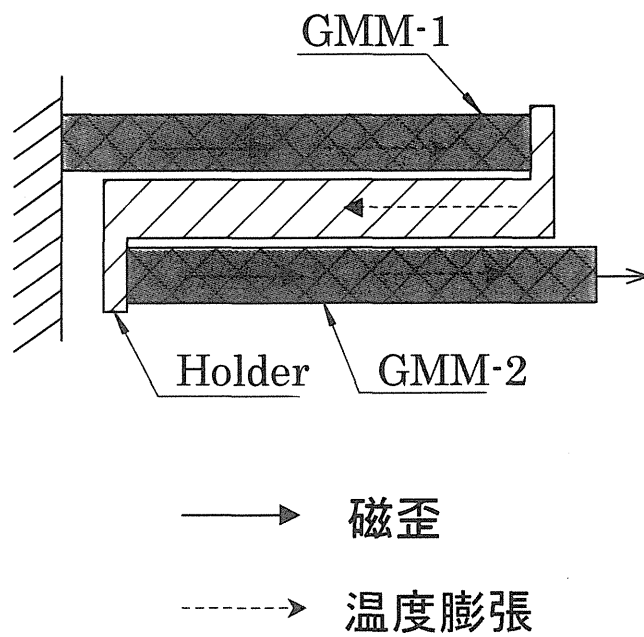


図 3-16 タンデム構成及び熱膨張キャンセル

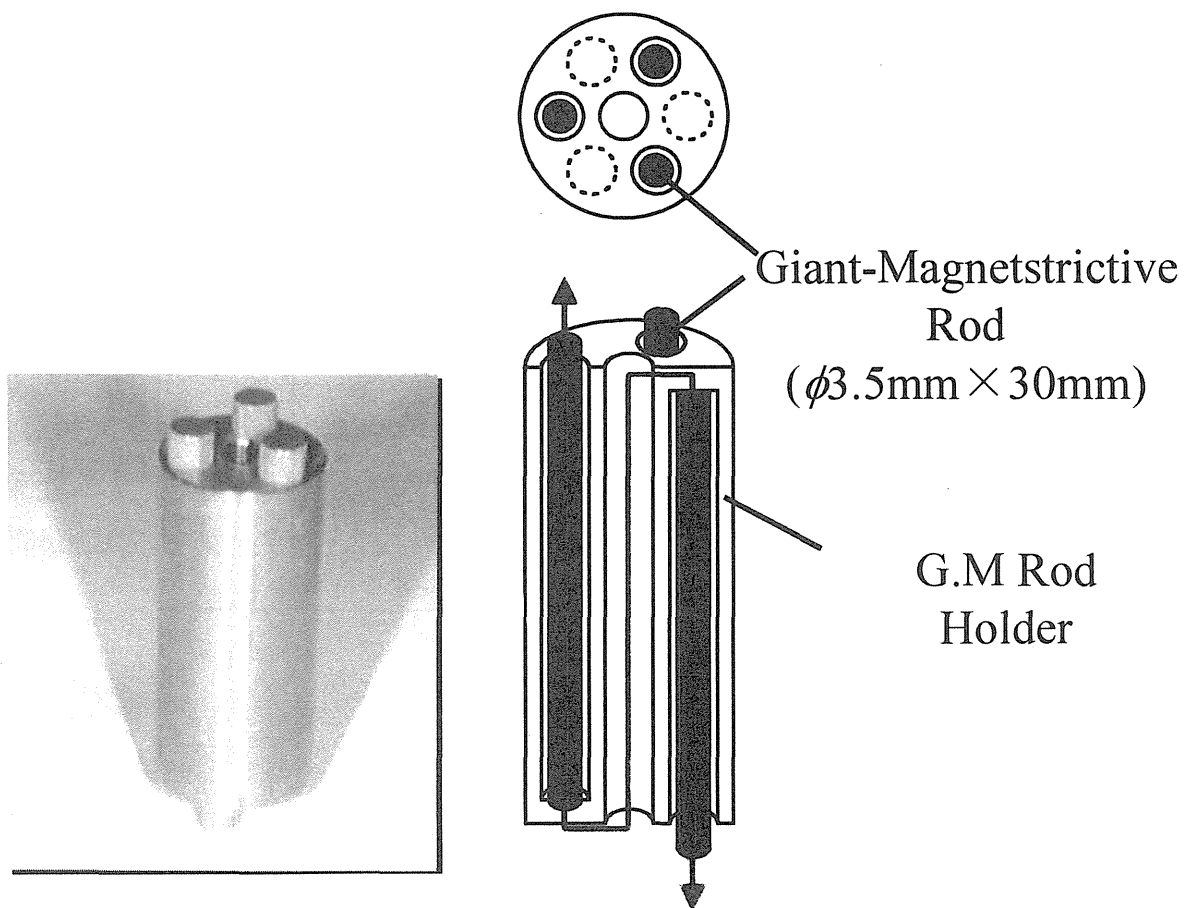


図 3-17 ホルダー部外観

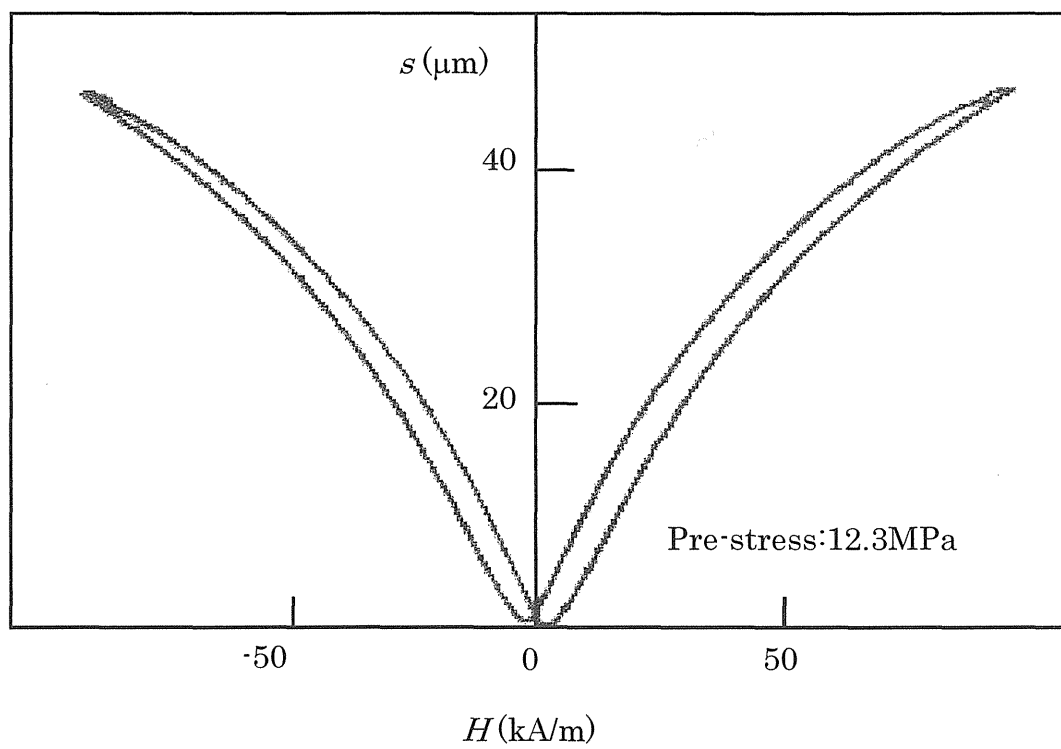


図 3-18 タンデム形超磁歪アクチュエータ変位特性

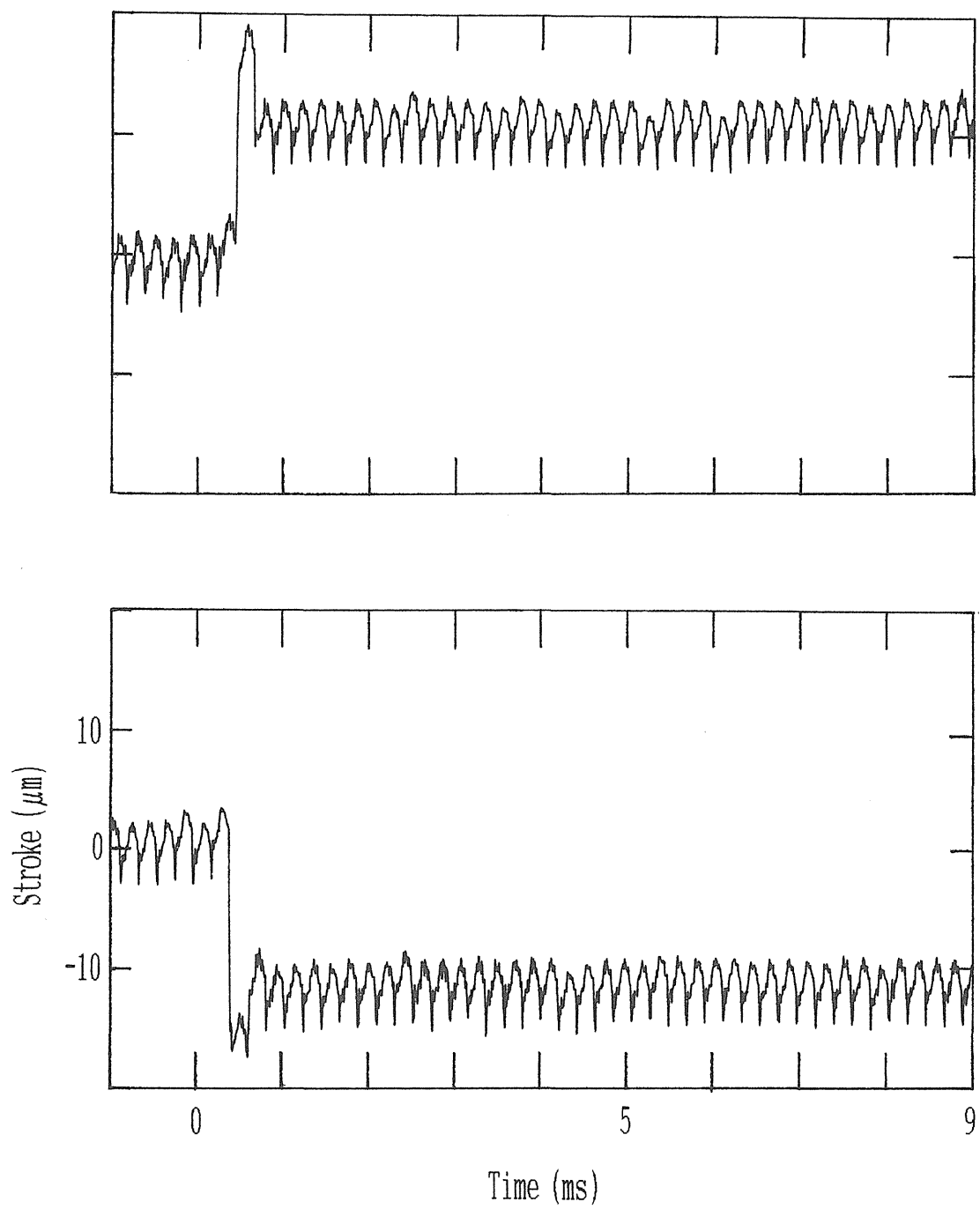


図 3-19 タンデム形超磁歪アクチュエータ過渡応答特性

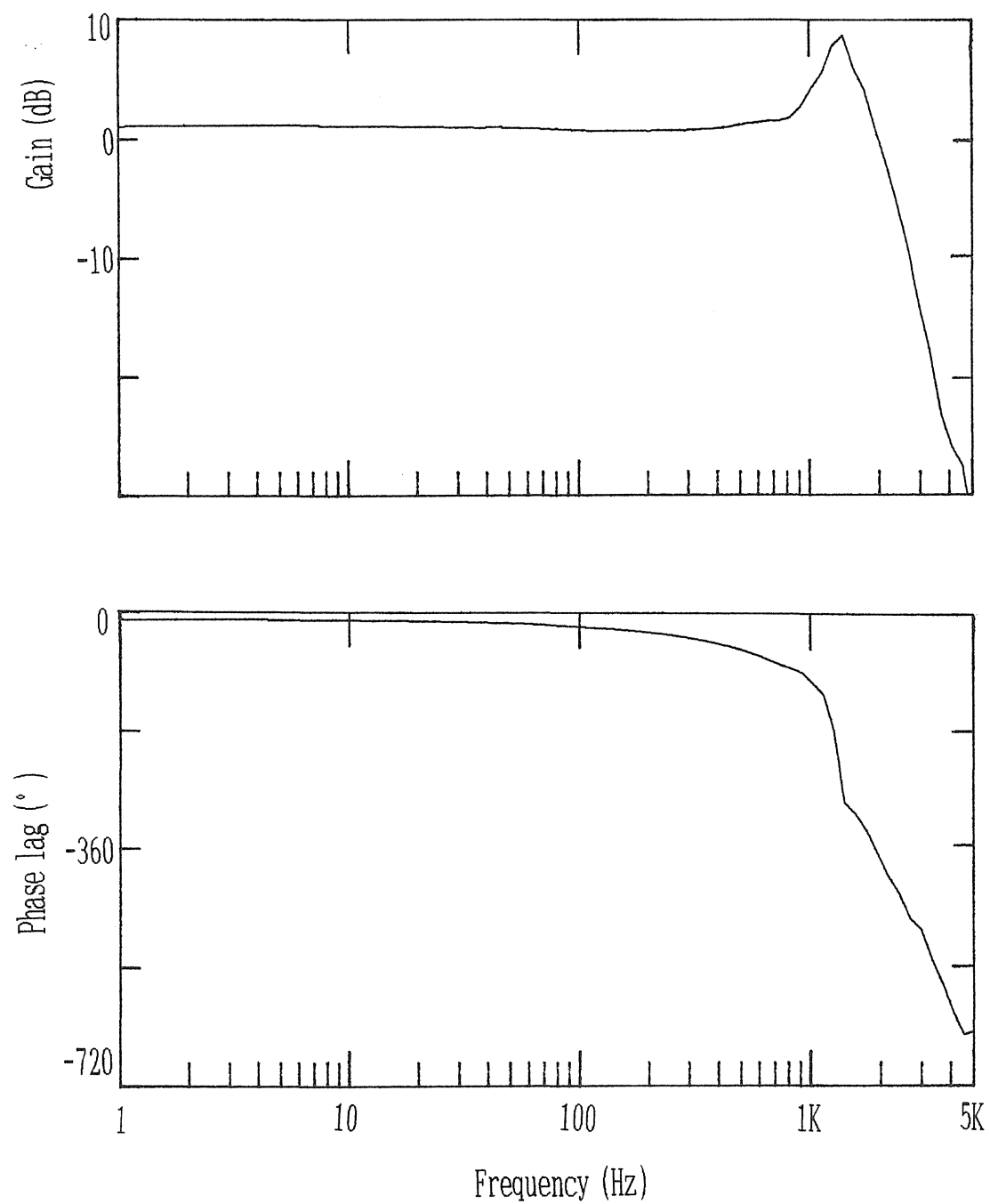


図 3-20 タンデム形超磁歪アクチュエータ周波数応答特性

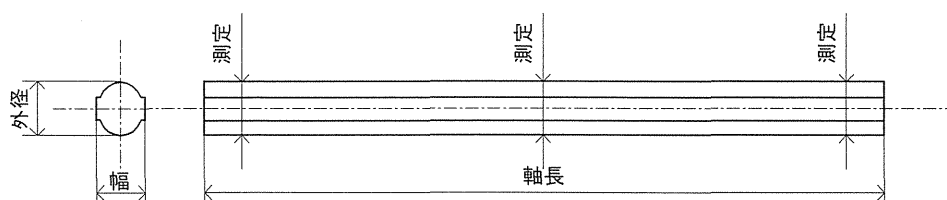
表 3-1 タンデム形超磁歪アクチュエータ仕様

Max Stroke	50 [μ m]
Frequency response (closed loop, $\pm 20 \mu$ m) @-3dB/@90° phase Lag	800Hz/600Hz
Step response	0.3msec
Coil R_c / N_c Max Current : $I_{c_{MAX}}$	1.8 Ω / 300turn 18A
Natural frequency : f_n	2.8kHz(meas.)

表 3-2 試験片寸法

実験番号	試験片番号	外径 (mm)	幅 (mm)	軸長 (mm)	質量 (g)
①	① - 1	3.469	3.389	30.013	2.1314
	① - 2	3.477	3.355	30.013	2.1301
	① - 3	3.455	3.383	30.014	2.1346
	① - 4	3.489	3.346	30.014	2.1429
	① - 5	3.423	3.356	30.014	2.0761
	① - 6	3.490	3.381	30.014	2.1563
②	② - 1	3.448	3.391	30.015	2.1279
	② - 2	3.442	3.352	30.016	2.1006
	② - 3	3.426	3.390	30.017	2.1133
	② - 4	3.511	3.389	30.018	2.1616
	② - 5	3.505	3.389	30.019	2.1716
	② - 6	3.491	3.344	30.020	2.1400
③	③ - 1	3.403	3.345	30.020	2.0743
	③ - 2	3.462	3.356	30.020	2.1080
	③ - 3	3.482	3.391	30.020	2.1772
	③ - 4	3.479	3.401	30.021	2.1227
	③ - 5	3.449	3.351	30.021	2.1150
	③ - 6	3.424	3.358	30.021	2.0878
④	④ - 1	3.491	3.393	30.009	2.1550
	④ - 2	3.467	3.403	30.010	2.1380
	④ - 3	3.508	3.384	30.011	2.1882
	④ - 4	3.502	3.390	30.013	2.1687
	④ - 5	3.477	3.392	30.013	2.1627
	④ - 6	3.494	3.395	30.013	2.1494

※ 試験片寸法はマイクロメータで測定、質量は電子天秤で計測た。
外形および幅は3箇所での測定値の平均値を採用た。



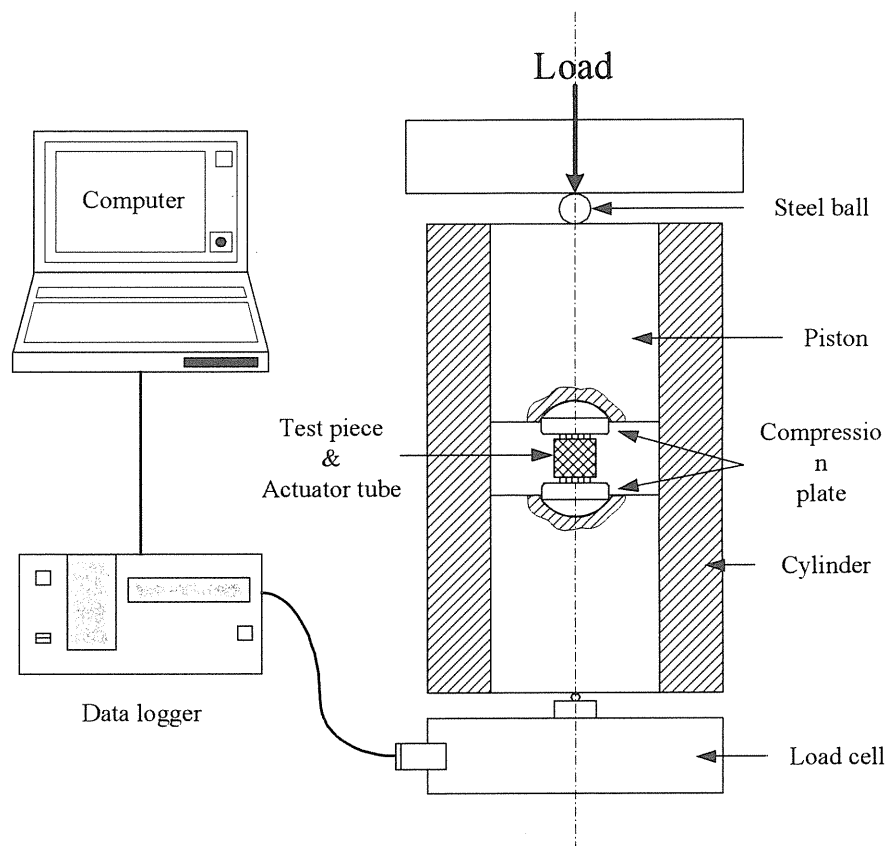


図 3-21 アクチュエータ強度試験装置概略図

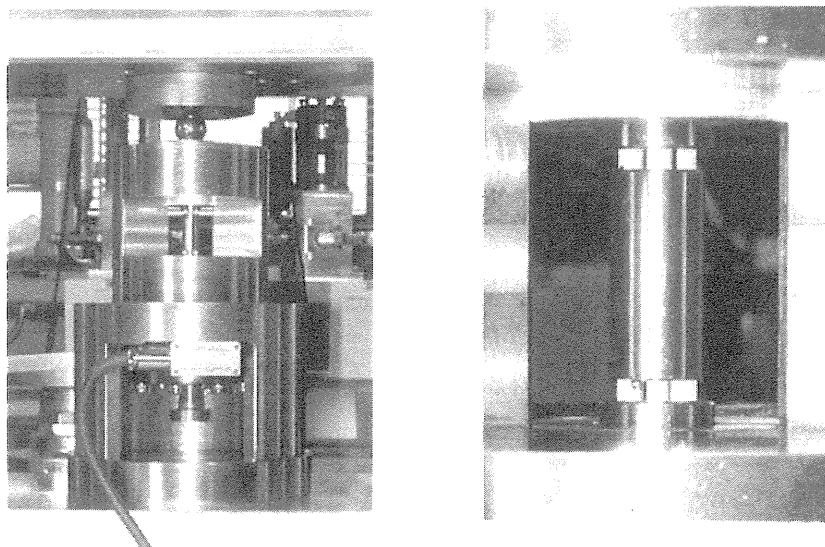


図 3-22 装置写真

表 3-3 アクチュエータ圧縮強度試験結果

Experiment no.	Compressive strength (kgf)	Compression plate
①	1069	SKD11
②	1104	WC-5%Co
③	1015	SKD11
④	936	SKD11
Average (kgf)	1031	

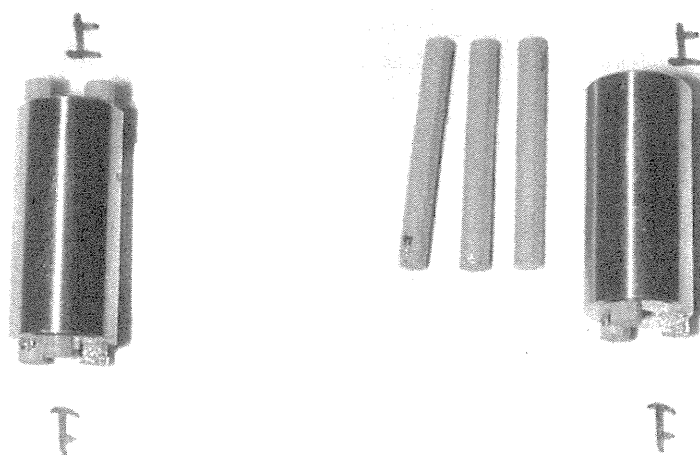


図 3-23 アクチュエータ破壊後試験片

第 4 章

タンデム形超磁歪アクチュエータの高速化

第4章で用いる記号

B	: 磁束密度
E_C	: コイル電圧
F	: 超磁歪アクチュエータ推力
f_n	: アクチュエータ共振周波数 $= \omega/2\pi$
H	: 磁界の強さ
I_C, R_C, L_C	: コイル電流、抵抗、インダクタンス
k_d	: 皿ばねのばね定数
k_{GMM}	: 超磁歪材料のばね定数
m_d	: 可動質量
m_{GMM}	: 超磁歪材料質量
N_C	: コイル巻数
t	: 時間
U	: 入力信号
X	: アクチュエータ変位

4・1 はじめに

超磁歪材料は、磁気抵抗が大きい（比透磁率が 8 から 10 程度と小さい）ので、アクチュエータとしての出力変位、すなわち超磁歪材料の磁歪特性は、磁気回路に支配される⁽⁴⁻¹⁾。アクチュエータ駆動は、コイルによるソレノイド駆動であるので、コイル、磁気を通すヨーク、発生磁場に関し、最適な磁気回路設計を行う必要がある。また、超磁歪材料の磁場に対する歪み発生までは高応答だが、磁場を発生させるには、コイルでの電流駆動が必要となり、アクチュエータの高応答化には、電流入力から磁場発生までの応答が問題となる^{(4-2) (4-3)}。

本章では、発生磁歪の効率よい取り出し及びアクチュエータの高速駆動を目的に、磁気回路設計においてソレノイド部の設計、特にインダクタンス及び磁気回路ヨーク材料の選択に関し、静磁場解析及び渦電流の影響を動磁場解析を実施して調査し、その設計手法について検討を行う。

4・2 静磁場解析

4・2・1 基本構成の解析

アクチュエータ磁気回路形状と磁束の漏れの間関係を明らかにし、アクチュエータ出力の高変位化、コンパクト化を計る目的に、有限要素法による静磁場解析^{(4-4) (4-5)}を行なった。

解析モデルは図 4-1 のように軸対称静磁場とし、磁性体（磁気回路ヨーク部）の透磁率の非線形性（B-H特性）を考慮した非線形解析計算を行った。今回ヨーク材料は、飽和磁束密度が高く、渦電流損が少ないけい素鉄系を用いた。

電流値、ヨーク寸法をパラメータに、特性を確保し、かつ小型化を目指して解析を行った。図 4-2 が、その最終結果である。超磁歪材料の部分は、プログラム上の制約から、空隙とした。(a)が磁束線図で、磁束の通る様子がわかる。(b)が磁束密度の等しい点を結んだ等磁束密度線図で、磁気飽和や、磁束密度の分布がわかる。この結果より、ヨークを通ってきた磁束が、漏れなくプランジャーを通っていることが分かる。超磁歪材料の透磁率が空気の 8 から 10 倍程度であることを考慮すれば、解析上は空隙となっている超磁歪材料部分にも有効に磁束が通ることが予想される。また、超磁歪材料の歪が 0.1%程度に達するのに必要な磁束密度は 0.03T 程度であるが、磁束密度線図から超磁歪材料部分がその磁束密度に達していることが分かる。

以上から、超磁歪材料の変位を有効に取り出せる磁気回路設計（ヨーク寸法、コイル設

計、ヨーク材料)の指針は、以下の通りである。

- ・ ヨーク材料は、けい素鉄が良い。磁気飽和密度が高く寸法を小さく出来、かつ固有抵抗が高く渦電流の影響が小さいと予想される為高応答化に有利なことが理由である。
- ・ 磁気回路は、出来るだけ閉回路になるようにする。超磁歪材料の低透磁率による磁気漏れを防ぐ為である。
- ・ コイル長さは超磁歪材料より長めとし、超磁歪材料端にはヨークを接合する。これも磁気漏れを防ぎ、磁束密度を上げる効果が有る。
- ・ ヨーク寸法としては、外筒部は断面積を大きく取りやすいため、磁気飽和が生じない程度に薄くて良い。超磁歪材料両端に接合したヨークは、磁路面積が取り難いため、軸方向に長めに取り、外筒ヨークから回ってきた磁束を有効に通すようにする。

4・2・2 バイアス磁場

アクチュエータとして両方向動作（プラスマイナス変位）を求められる際は、あらかじめ磁場を与えて置き（バイアス磁場をかける）、超磁歪材料を前もって歪ませた状態で交流駆動することで達成できる。バイアス磁界には、バイアス電流を流しておくことで達成できるが、動作させないときも入力エネルギーが必要となり、経済性に劣る。そこで永久磁石でバイアス磁界をかけることとした。その際の磁気回路設計に関し、同じく磁気解析を行ったので、その結果を示す。

超磁歪材料にバイアス磁界をかける場合、そのバイアス値がヒステリシス・歪み率に影響されるということが報告されており、その最適バイアス磁界はおおよそ 24 から 32kA/m（約 300 から 400Oe）程度が良いとされている。また、バイアス磁界をかける前のアクチュエータ歪み特性の実測値(図 4-3)からも、0.1%以上の歪み量、及び良好な線形性を得るためには 48kA/m（約 600Oe）程度までの領域を使用するのが適当と確認できる。

しかし、その一方で電流駆動によるコイルの Joule 熱の発生は避けられず、時間・電流値に応じ、超磁歪材料の温度が上昇し、温度膨張を引き起こす。また本アクチュエータの場合、磁歪曲線上の歪み飽和領域までの使用は、ヒステリシス及び非線形による駆動アンプでの負荷電流が増大し、それに伴うアンプ発熱も問題となる。

そこで、次の 2 点を目標に解析を実施した。

- ・ 目標バイアス磁界は、24kA/m（約 300Oe）
- ・ 超磁歪材料を効率よく歪ませるために、超磁歪材料中に磁界を均一にかける。

解析は、超磁歪材料、マグネット、コイル、ヨーク、空気部を含めた軸対象モデルを、三角形・四角形混合要素を用いて、1632 節点、1681 要素に分割し、有限要素法によって行った。超磁歪材料、ヨーク材の磁気特性は、非線形な B-H 特性としてモデル化し、非線形解析を実施した。

(1) マグネット位置・長さによるバイアス磁界

図 4-4 にマグネットを超磁歪材料の両端に配した方式（以下、サイドマグネット方式）と、コイルの外側に配した方式（以下、外筒マグネット方式）の構成（軸対象）と、各々のマグネットの長さ L を変えたときの超磁歪材料中心軸上での磁化分布 B を解析した結果である。サイドマグネット方式での磁化分布は、超磁歪材料端で高く、中心部で低くなっている。これに対し、外筒マグネット方式での磁化分布は、サイドマグネット方式に比べ比較的均一磁場がかかり、L=40mm の場合には、ほぼ均等な磁場となっている。

(2) ヨーク形状によるバイアス磁界

外筒マグネット方式 (L=40mm) でヨーク形状をかえて解析を行った。解析結果の図 4-5 より、つば有り形状はつば無し形状に比べ、つば部からの磁気漏れが多く、超磁歪材料の中の磁化の値も小さくなることが分かる。

(3) 実験値との検証

解析結果から求めた磁化分布 B と超磁歪材料の B-H 曲線（非線形を考慮）とから、超磁歪材料内各点での磁界強度 H を算出し、その平均値から磁界のバイアス値を概算すると、サイドマグネット方式の場合、L=2mm で 11kA/m（約 140Oe）、L=5mm の場合 15.2kA/m(約 190Oe)となる。また、外筒マグネット方式では、L=40mm（つば無しヨーク形状）で 25.6kA/m（約 320Oe）、つば有りで 22.4kA/m(約 280Oe)、L=60mm（つば無し）の場合 28kA/m（約 350Oe）となった。

次に上記解析の検証として、以下の構成のアクチュエータを試作し、バイアス磁界をかけた場合の歪み曲線とバイアス値（実験値）を求めた(図 4-6)。

- (a) サイドマグネット方式（ $\phi 6 \times L2\text{mm}$ ）
- (b) サイドマグネット方式（ $\phi 6 \times L5\text{mm}$ ）
- (c) 外筒マグネット方式（ $\phi (30-25) \times L40\text{mm}$ ） つば有り形状
- (d) 同上、つば無し形状

その結果、サイドマグネット方式の (a) (b) の場合は解析で求めたバイアス値と等しくなるが、外筒マグネット方式では解析値の方が実験値より大きくなった。これは、外筒マグネット方式は、磁界の漏れが大きいために、解析モデル以外の部分（例えばボディ部、ヨーク接合ねじ部など）での磁界漏れの影響があるためと思われる(図 4-7)。

以上の計算結果と実験結果より、外筒マグネット方式($L=40\text{mm}$ 、つば無しヨーク形状)の場合に、ほぼ目標のバイアス値を得たこととなり、以下の点でバイアス磁界用マグネット構成として優れていることが分かった。

- ・ 解析結果に見合うバイアス磁界がかけられる。
- ・ つば部での磁気漏れが少ない。
- ・ 超磁歪材料には均一磁界がかけられる。駆動時の超磁歪材料内での磁歪率が均一化でき、駆動時の材料内部での発生応力の低減、信頼性の向上につながる。

4・3 アクチュエータ高速化（動磁場解析）

超磁歪アクチュエータの応答遅れは、「ソレノイドインダクタンスによる電流遅れ」、「磁気回路に生じる渦電流による磁界の遅れ」、「超磁歪材の磁界に対する推力（磁歪）の遅れ」「アクチュエータのばね－質量系の機械的遅れ」が考えられる。ここでは、各遅れ要因の分析と、それに基づく改善による高速応答化について実施した結果を示す。

4・3・1 アクチュエータの動的モデル

線形化した系として現わした本アクチュエータのブロック線図を図4-8に示す。

各ブロックに関し、遅れの要因を考察する。まず超磁歪材の推力の遅れ(T_G)は、 nsec から μsec と、測定結果の遅れ 0.7msec に対し十分高速である。機械的遅れに関しては、可動部の軽量化、小型化が望まれるが、アクチュエータ要求性能を考えると大幅な改善は望めない。ちなみに、本アクチュエータの実測固有振動数 2.8kHz は、皿ばねと超磁歪材料を直列ばねとし、プランジャ及びホルダーの質量を可動質量に、超磁歪材料の質量をばね質量とした時の計算値約 3.3kHz とほぼ一致する。

残る電流遅れ(T_G)、磁界遅れ(T_B)に関しては、有限要素法による磁場解析を行い、遅れへの影響を調べた。

4・3・2 渦電流の影響（動磁場解析）

解析に際し、簡略化の為に解析対象を2次元軸対称モデルとし、ヨーク材(3%ケイ素鉄)と超磁歪材料の磁気非線形特性 ($B\cdot H$ 特性、図4-9) 及び渦電流の影響を考慮して、図4-10のコイル印加電圧を印加条件として、磁界の過渡応答を、市販の磁場解析ソフト ANSYS を用いて調べた。

図4-11 から 13 は、定常状態 ($t=\infty$) での解析結果で、それぞれ磁束密度、磁束線図、

磁場の強さを示す。磁気回路での磁気飽和は見られず、磁束が有効に超磁歪材料を通過している。

図 4-14 は磁束の過渡応答の解析例で、渦電流の影響のため、印加電圧直後は、磁束はヨーク及び超磁歪材料の表面近傍に集中して流れている。超磁歪材料内は、時間と共に磁束が浸透し、0.7msec では静磁場解析結果にほぼ等しい定常状態($t=\infty$)に到達している。なお、ヨーク材内では、1.1msec でもまだ定常状態には達していない。

図 4-15 は、超磁歪材料中心付近での、磁束密度の過渡応答の計算結果である。電流の立ち上がりと共に磁束密度も追従しており、その遅れは0.05msec程度とごくわずかである。

以上の結果から、磁気回路内の渦電流による超磁歪材料内の磁場の立ち上がりの遅れ(T_B)は応答特性への影響は小さく、応答時間 0.7msec の大部分は、コイル電流の立ち上がりの遅れ(T_C)、すなわちソレノイドのインダクタンスの大きさが支配的である事が分った。

4・3・3 過励磁駆動法とコイル再設計

図 4-16 はコイルを 1130 ターン、抵抗 7.7 オームとした (コイル A) 場合の過渡応答測定結果で、コイルの印可電圧 (E_C) と変位 (X) を示す。この場合では $50\mu\text{m}$ 変位に約 0.7msec を要している。

磁場解析結果から、過渡応答特性改善として、

- ・ コイルターン数を減らし、インダクタンスを小さくする ($N_C=300$ ターン、 $R_C=1.8\Omega$)。
- ・ アンペアターンを一定にする為、コイル入力電流を増加する。

の 2 点を対策案とした。コイル電流を増加させると共に、超磁歪アクチュエータの駆動には、ソレノイドのインダクタンスによる電流の遅れ、および超磁歪素子を磁化する際に磁気回路に発生する渦電流による磁界の遅れを補償するため、噴射指令 1 パルスに対して図 4-17 に示す電流波形でソレノイドを励磁する過励磁回路を用いた⁽⁴⁻⁶⁾⁽⁴⁻⁷⁾⁽⁴⁻⁸⁾。駆動回路で形成される電圧、電流波形は (1) 電磁氣的遅れを補償する領域と (2) 定常状態を保つ領域に分けられる。駆動回路では入力パルス信号に対して、電源電圧 95V、時間幅 0.2ms のワンショット電圧パルスで電磁氣的遅れを低減し、その後は電源を電源電圧 24V のスイッチング電源に切り換え、予め設定された定常電流値になるように電流制御を行うシーケンスとなっている。

4・3・4 応答特性試験

図 4-17 は、300 ターンコイル(コイル B)のものと過励磁消磁回路を用いて励磁し、電流の過渡応答を改善した時のコイル電流(I_C)及び電圧(E_C)の波形を測定したものである。

また図 4-18 は、コイルの巻き数を $N_C=1130$ ターン(コイル A)と 300 ターン(コイル B)の 2 種類のものを用いて変位の応答を比較したもので、300 ターンコイル(コイル B)のもの

は応答時間が 0.3msec と 1130 ターンコイル(コイル A)のものより約 2.3 倍の速さとなり、当初の目標を達成できた。

表 4-1 に今回開発したタンデム形超磁歪アクチュエータの仕様（高速タイプ）を示す。

第 4 章参考文献

(4-1)江田、佐橋、小林、超磁歪アクチュエータに関する研究(第 1 報)、精密工学会誌、56-2(1990)、388-392

(4-2) 田中、油空圧のデジタル制御と応用、近代図書(1987)、67

(4-3) 田中、高速電磁弁に関する研究、日本機械学会論文集 C、50-457(1984)、1594

(4-4) 佐藤、砂糖、田中、高速電磁弁用ソレノイドの渦電流を考慮した FEM 磁場解析、平成 4 年度秋季油空圧講演会論文集(1992)、25

(4-5) 榎園、電磁場シミュレーション技術、機械の研究、44-1(1992)、215

(4-6) 佐藤、佐藤、田中、矢内、高速電磁弁の弁切り替え特性に及ぼす渦電流の影響、油圧と空気圧、24-4(1993)、504

(4-7) 石黒、坪島、宮川、交直マグネットの設計と応用、オーム社(1981)、33

(4-8) 佐藤、田中、矢内、高速電磁弁の応答性と流量特性の改善、平成 4 年度秋季油空圧講演会論文集(1992)、21

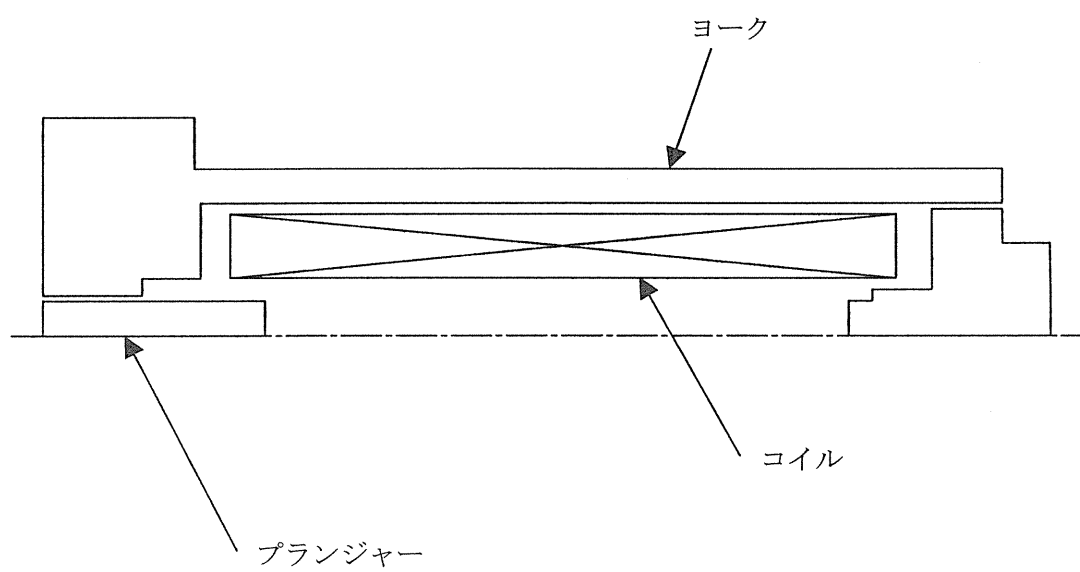
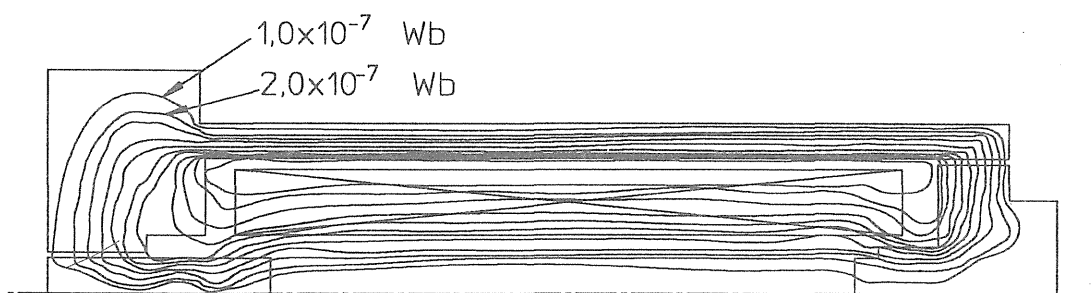
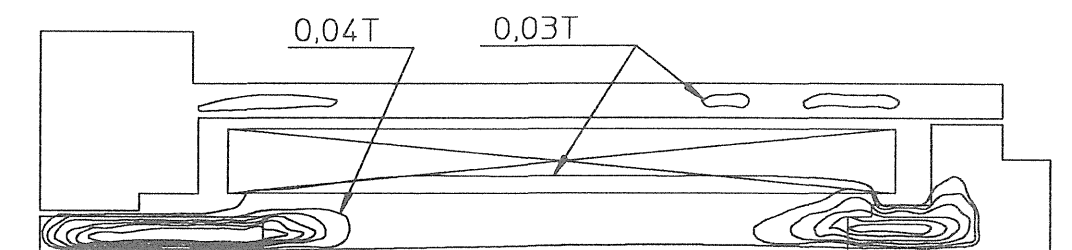


図 4-1 静磁場解析モデル



(a) Flux Distribution



(b) Flux Density Distribution

図 4-2 静磁場解析結果

- (a) 磁束線図
- (b) 磁束密度

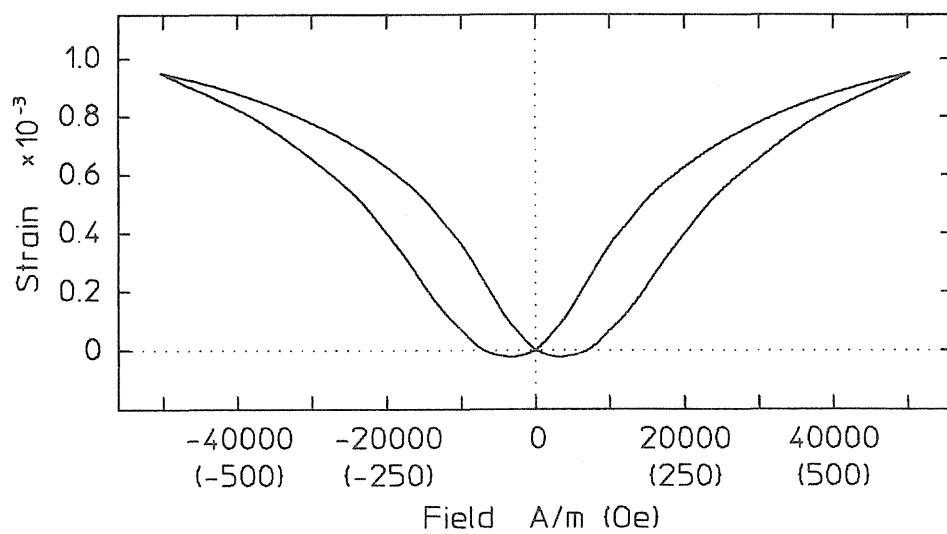


図 4-3 アクチュエータ歪み特性

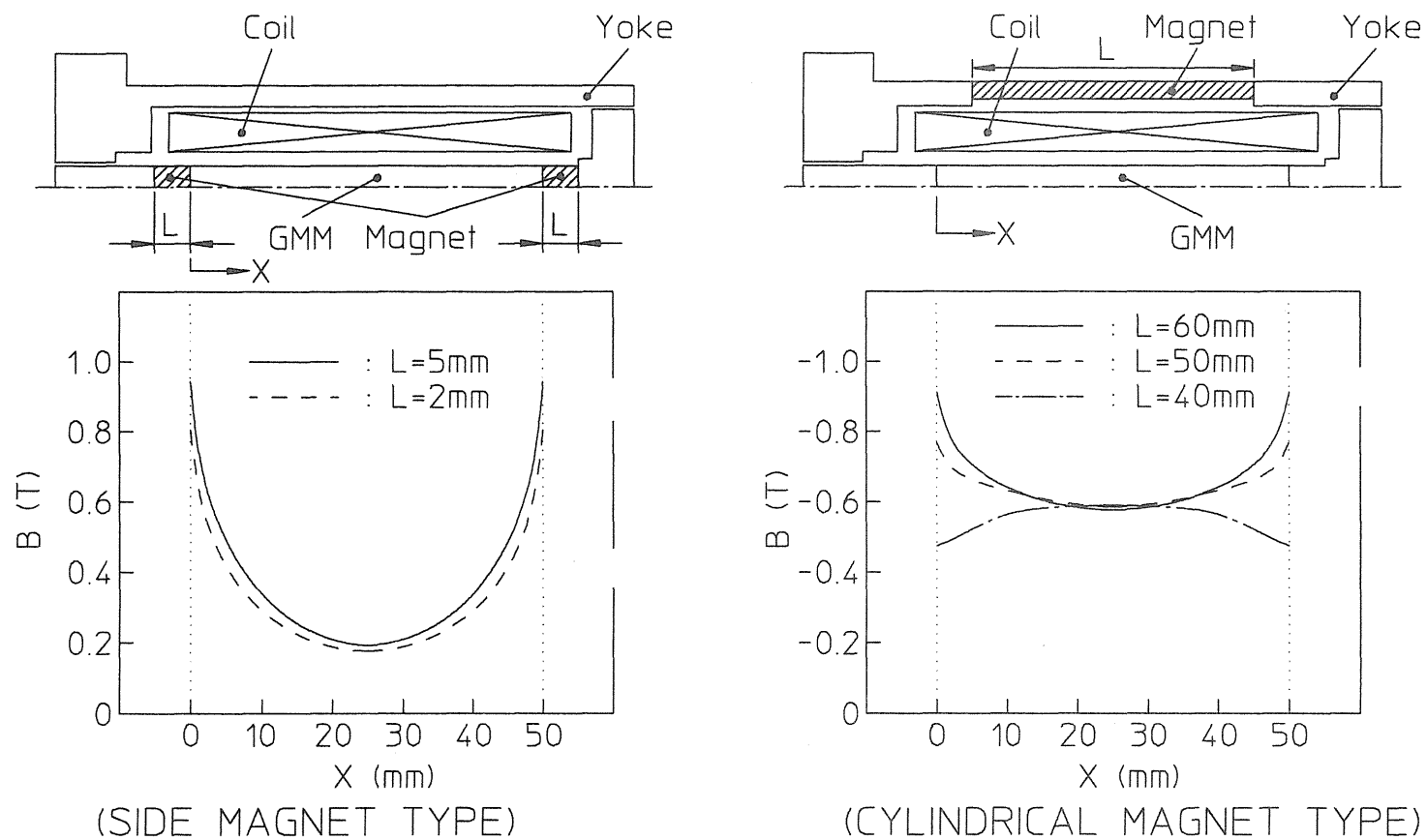


図 4-4 静磁場解析結果 (バイアス磁界)

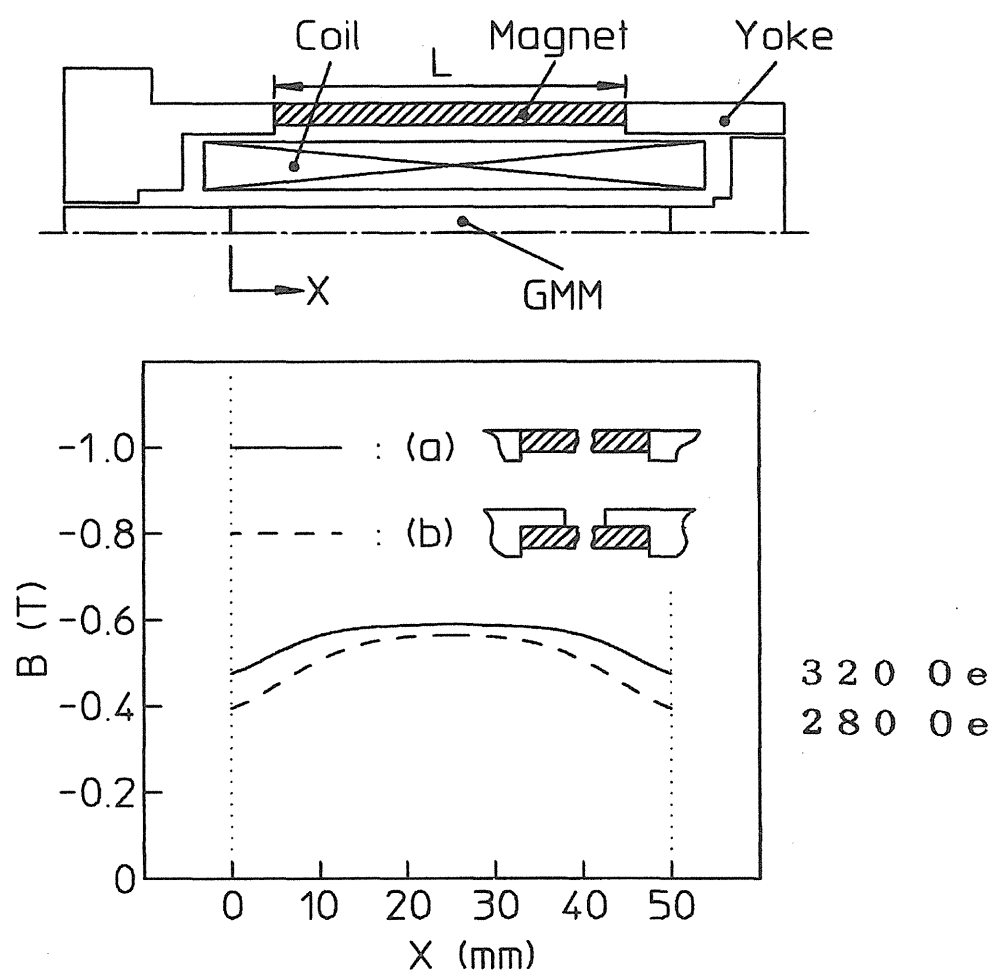


図 4-5 バイアス磁場解析結果（ヨーク形状の影響）

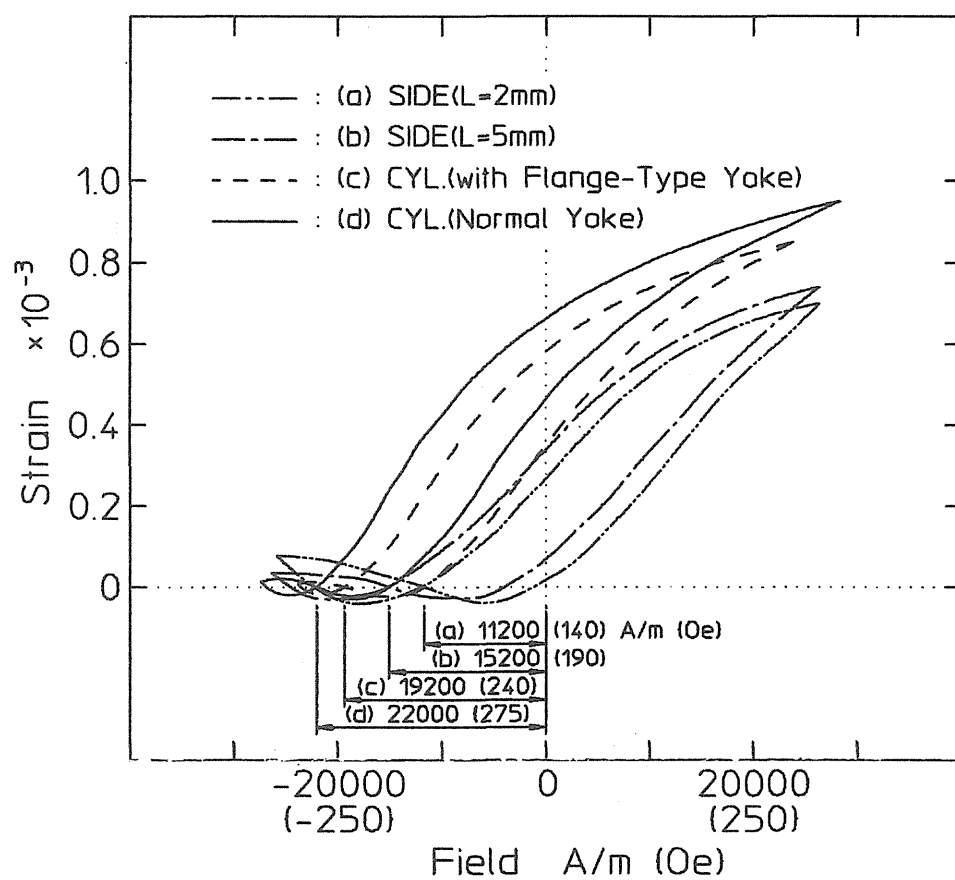
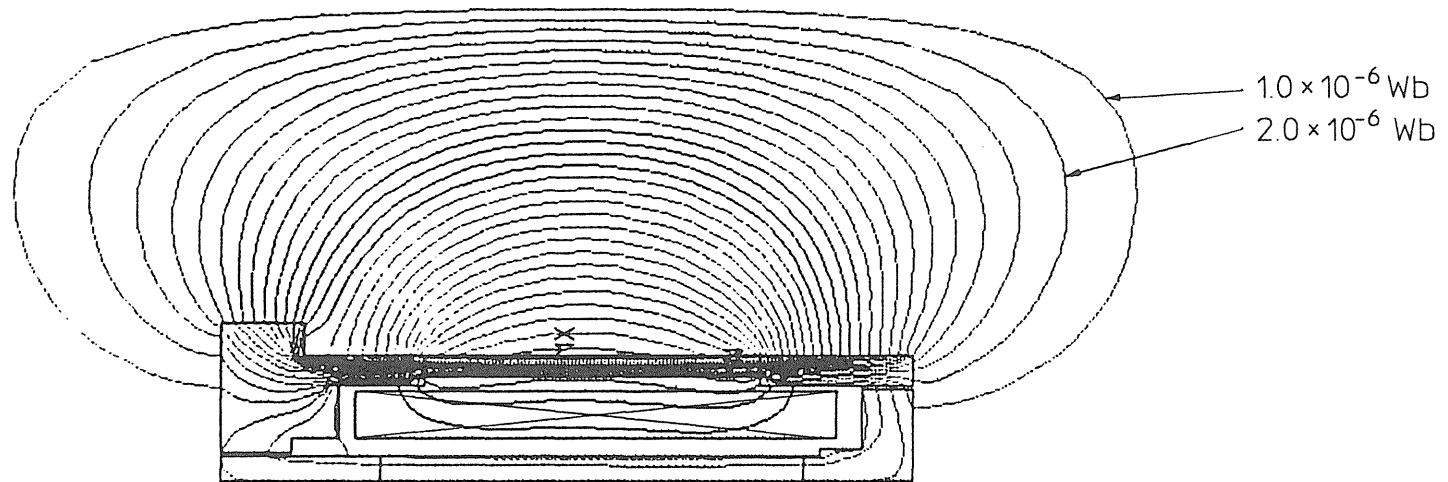
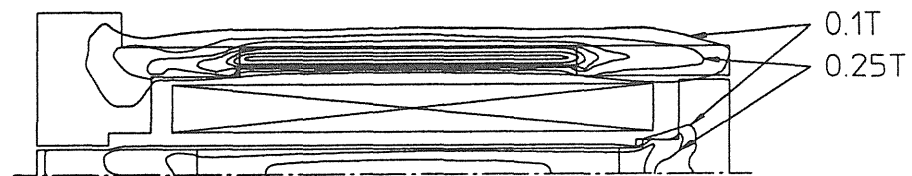


図 4-6 バイアス磁界試作結果



(a) Flux Distribution Line



(b) Flux Density Distribution

図 4-7 バイアス磁界用マグネット入り超磁歪アクチュエータ静磁場解析結果（磁束線図及び磁束密度線図）

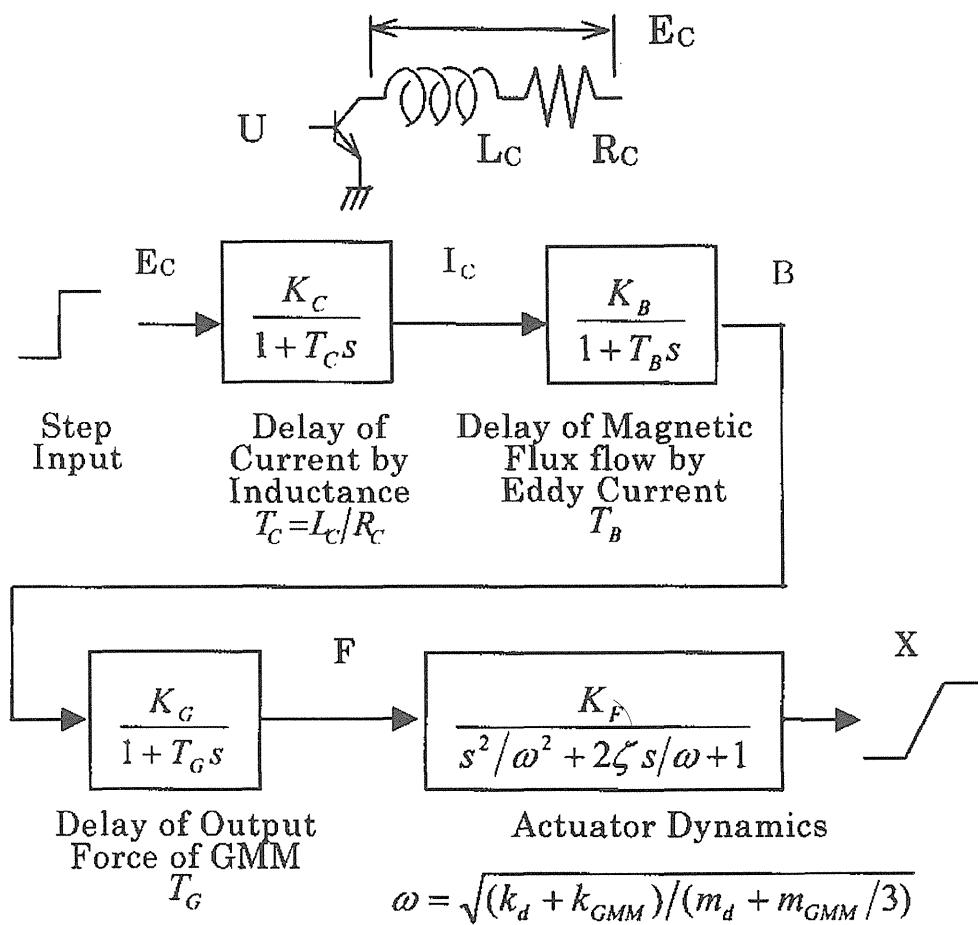
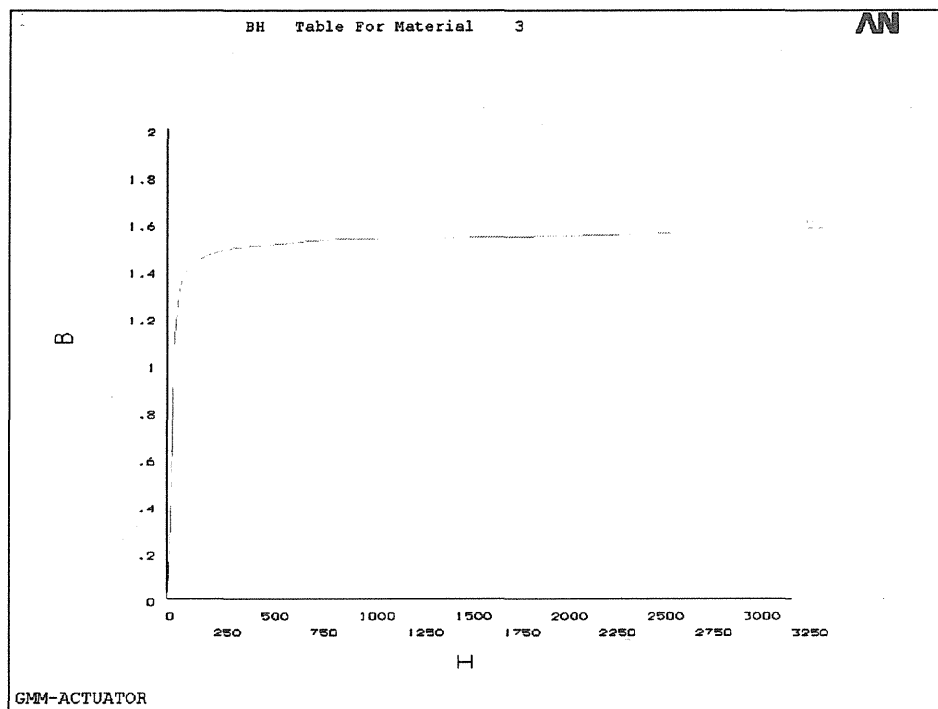
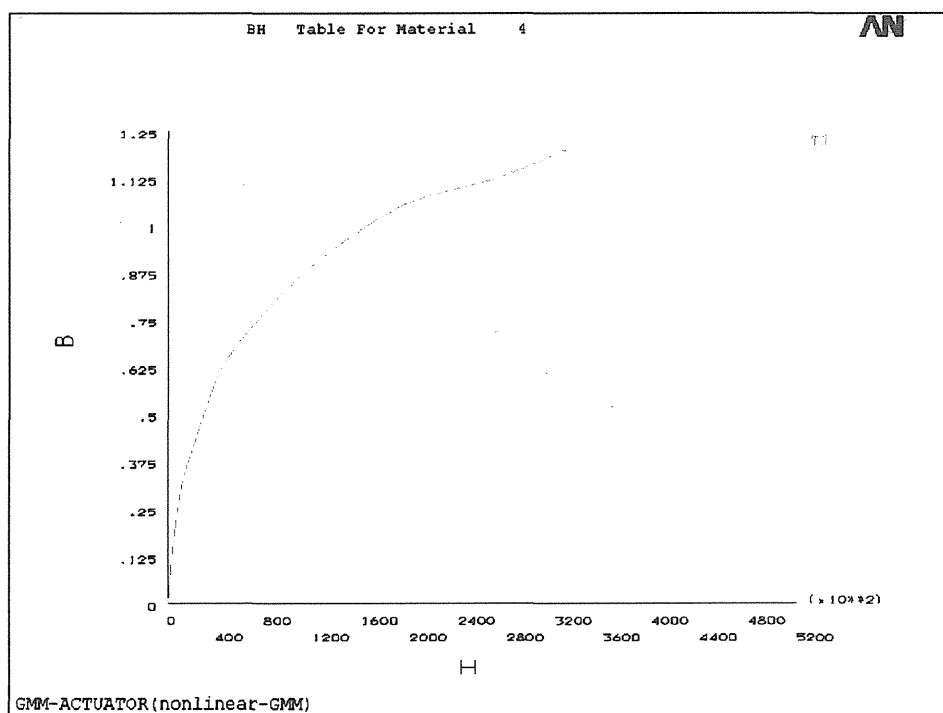


図 4-8 超磁歪アクチュエータブロック線図(線形モデル)



(a) ヨーク (3%けい素鉄)



(a) 超磁歪材料

図 4-9 材料の B-H 特性 (磁場解析用)

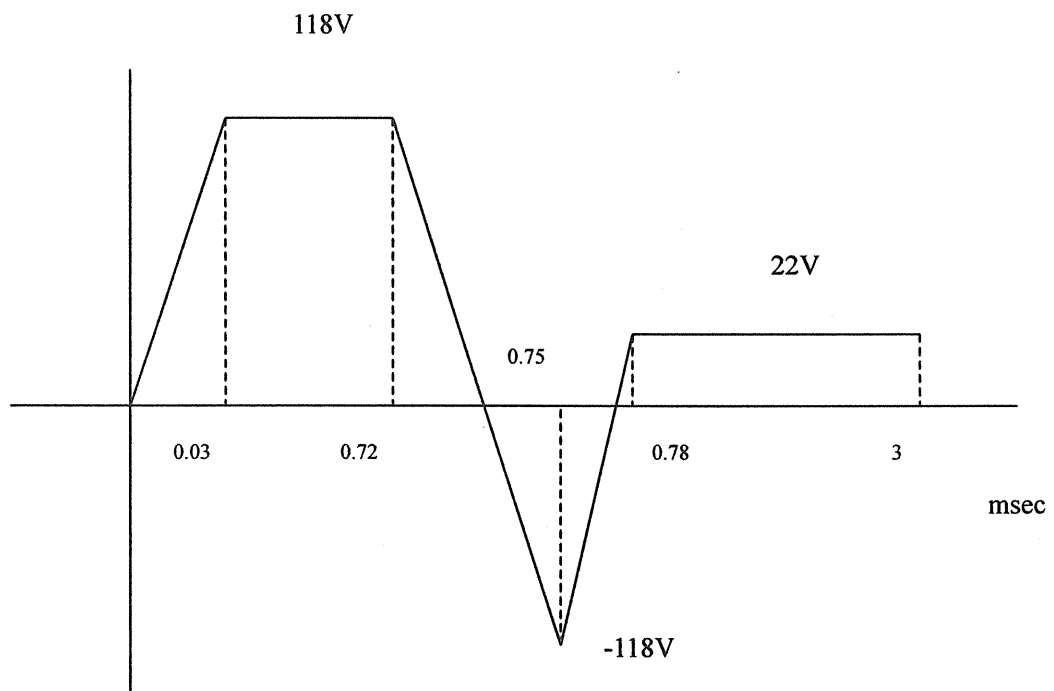


図 4-10 コイル印可電圧(解析用)

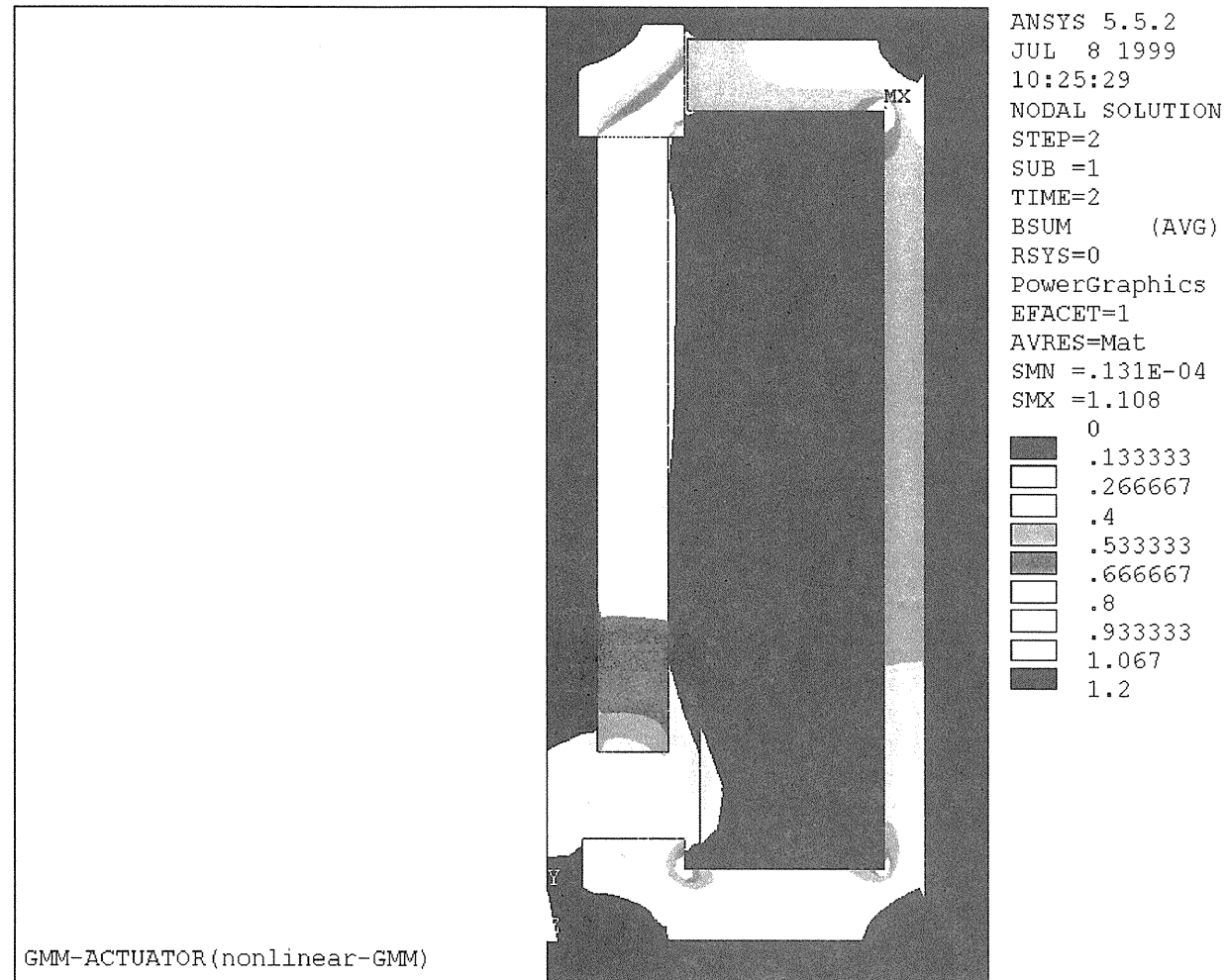


図 4-11 解析結果（磁束密度、定常状態）

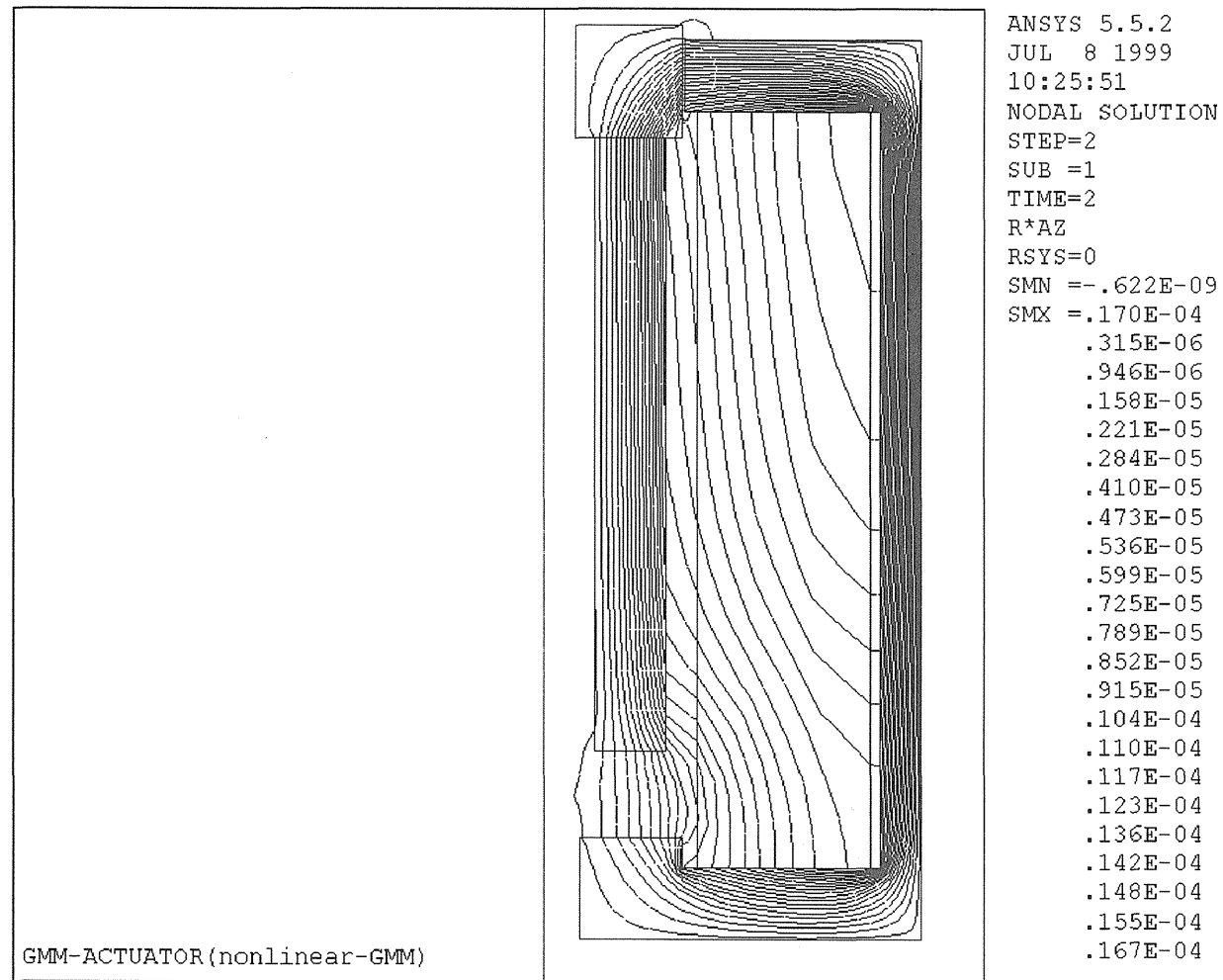


図 4-12 解析結果 (磁束線図、定常状態)

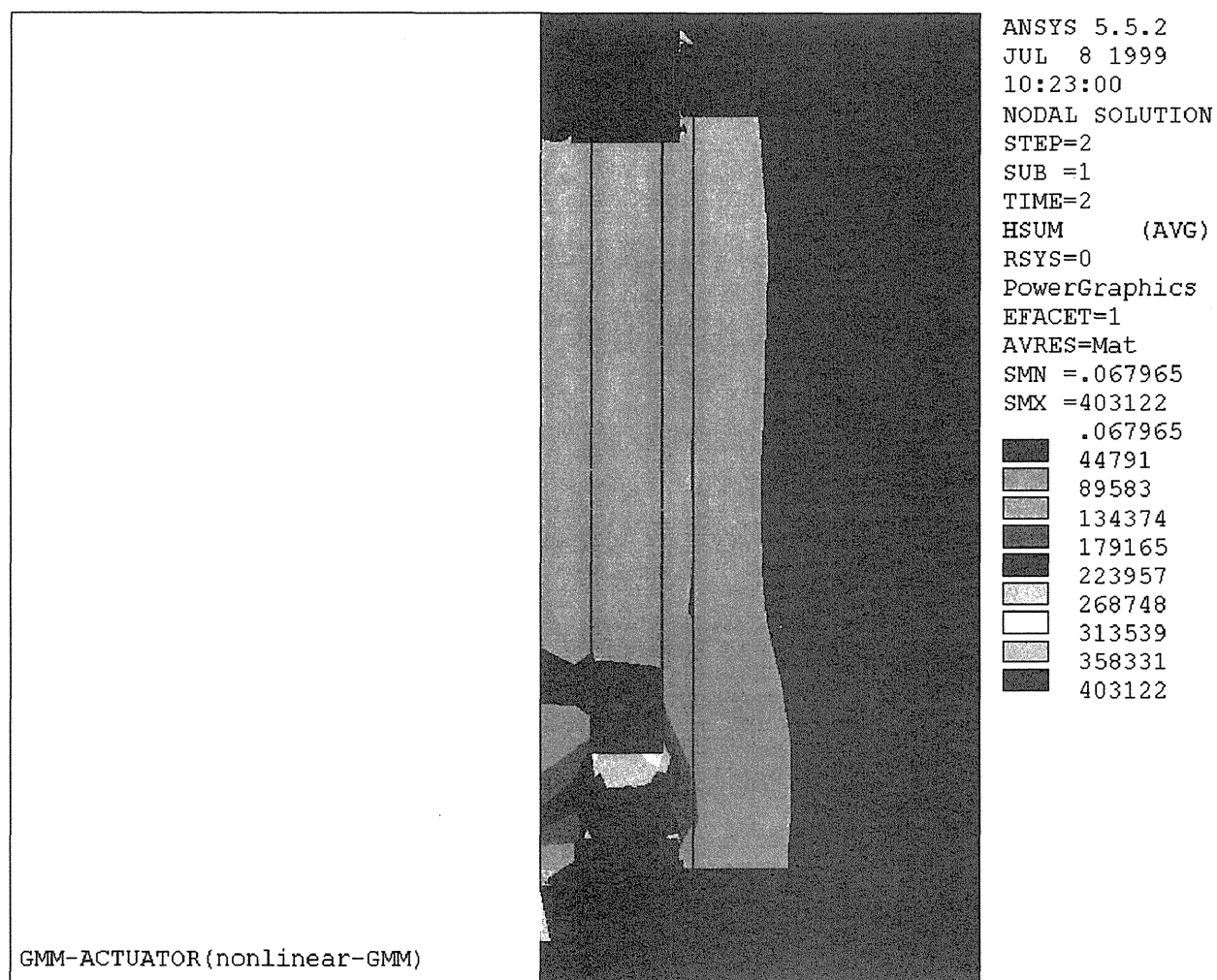


図 4-13 解析結果（磁場の強さ、定常状態）

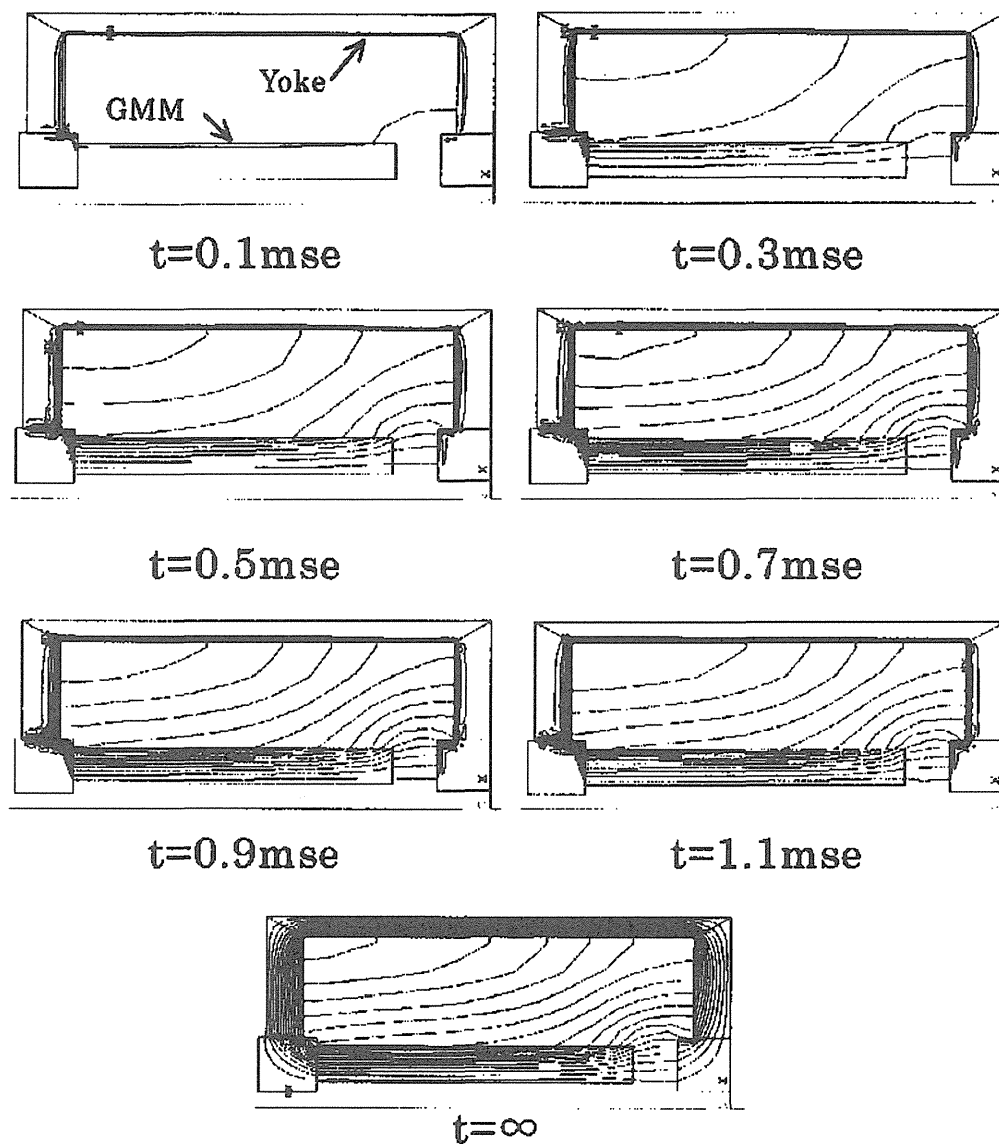


图 4-14 磁束応答解析結果 ($1 \mu \text{Wb/line}$)

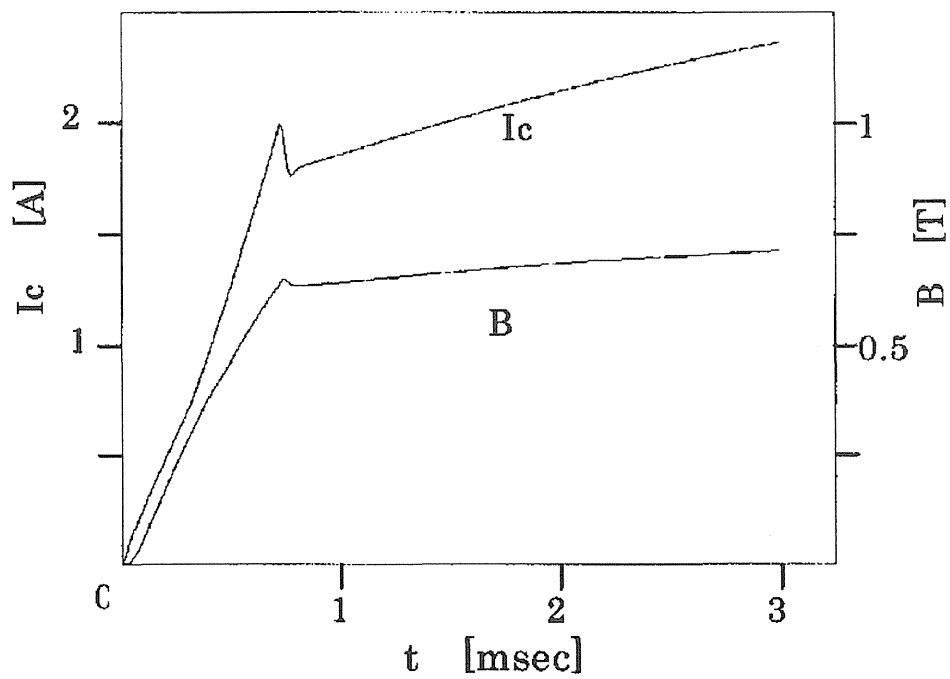
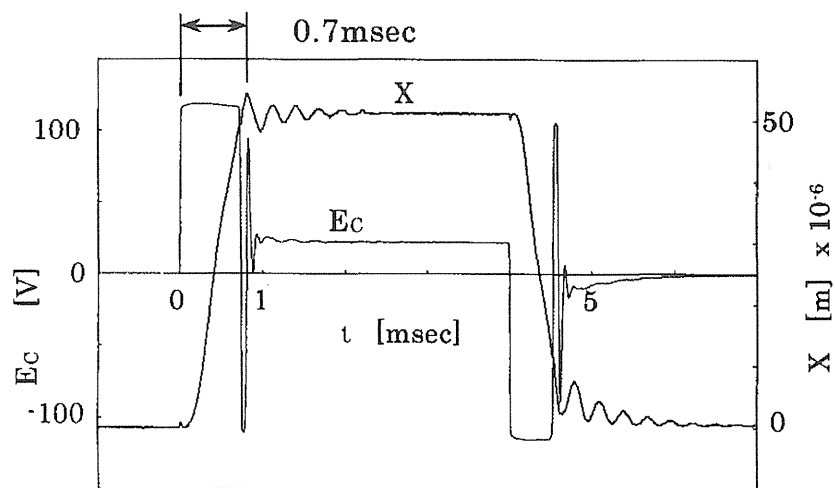
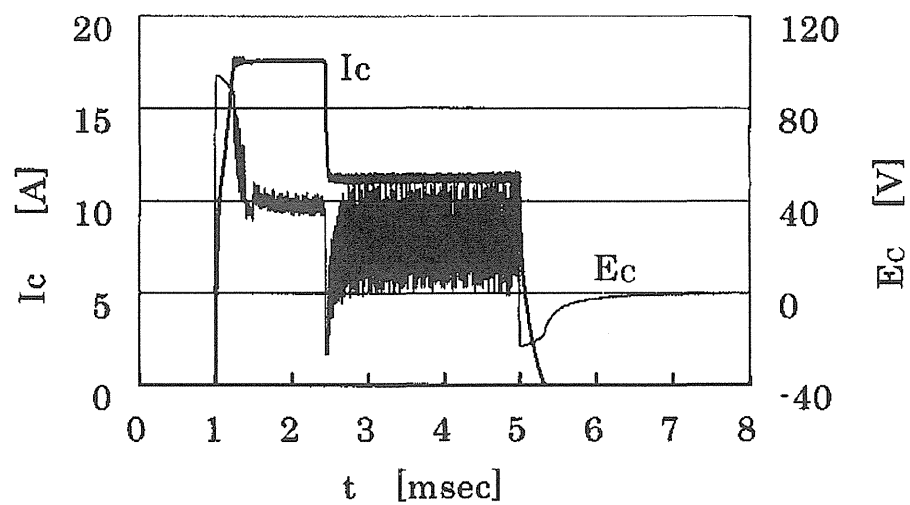


図 4-15 コイル電流 (I_c) 及び磁束密度 (B) の過渡応答(解析結果)



(open loop, coil A, $N_c=1130\text{turn}$, $R_c=7.7\Omega$)

図 4-16 過渡応答 (入力電圧 E_c 及び超磁歪アクチュエータ変位 X)



(300T coil(B) energized by over exciting electric circuit)

図 4-17 過励磁回路電圧及び電流波形

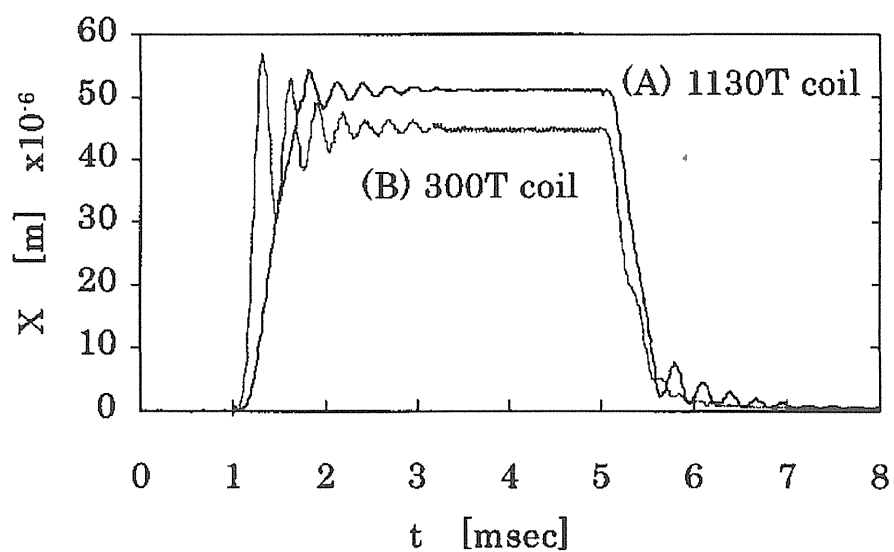


図 4-18 超磁歪アクチュエータ過渡応答 (実測)

表 4-1 超磁歪アクチュエータ仕様

Max Stroke	50 [μ m]
Frequency response (closed loop, $\pm 20 \mu$ m) @-3dB / @90° phase Lag	800Hz / 600Hz
Step response	0.3msec
Coil R_C / N_C Max Current : $I_{C_{MAX}}$	1.8 Ω / 300turn 18A
Natural frequency : f_n	2.8kHz(meas.)

第 5 章

高速サーボ弁への適用とその性能

5・1 はじめに

近年、航空機からアミューズメントシミュレータに至るまで、あらゆる油圧機器において、高圧下で微少流量から大流量までを効率よく制御できる電気油圧サーボ弁が必要とされてきている。さらに、高応答で無駄な漏れの無いサーボ弁のニーズがたかまりつつある。

現在のサーボ弁はノズルフラップ型(図 5-1)がおもで、その小型コンパクトで、応答性に優れ、消費電力が小さい特長から、航空機から試験装置など、高度な制御を必要とする様々な分野で使用されている。しかし、その構造的特徴であるトルクモータの動作原理より、実用流量には関与しないファーストステージ流量が必要で、また作動油の汚染管理にも注意を払う必要がある。このような理由から、リーケージが無くコンタミネーションに強い、高応答なダイレクトドライブサーボ弁 (DDV) のニーズが高まっている。

本章では、その要望にこたえる事を目標に開発した、タンデム形超磁歪アクチュエータにて直接スプールを駆動するダイレクトドライブサーボ弁の構成と性能に関し示す。

5・2 直動型サーボ弁 (ダイレクトドライブサーボ弁、DDV)

高応答なDDVの開発例としては、ボイスコイルモーター(VCM)⁽⁵⁻¹⁾⁽⁵⁻²⁾、可動鉄片型リニアフォースモータ(LFM)⁽⁵⁻³⁾、圧電または電歪素子によるもの等がある⁽⁵⁻⁴⁾。

VCMは、図 5-2 に示すように永久磁石とヨークで構成される磁気回路の空隙(エアギャップ)内に、駆動用可動形コイル(ボイスコイル)を配置し、直接スプールを駆動する。ボイスコイルの駆動原理は、磁束と直交する向きに電流を流すと、両者の直交方向に力が発生するというフレミング左手の法則によるものである。その発生力は、

$$F = Bli \quad (5-1)$$

と現わされる。ここで B は磁束密度、 l はコイル長さ、 i は電流である。また、可動部質量を m 、スプール支持ばね定数を k とすると、固有振動数 f_n は、

$$f_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5-2)$$

と単純に近似できるため、制御系を含め設計が容易である。

特長としては、大型のものでは 15mm ストロークが可能のように変位が大きくとれ、応答性も良い。コイル位置による発生力も一定(図 5-3)で、アクチュエータとしてのゼロ調整を細かくする必要が無い。しかし出力そのものは数 N/A 程度の低い出力係数しかなく、大きな力を発生させるには、磁石を大型にしてエアギャップの磁束密度を上げるか、入力電流を高く設定する必要がある。しかしヨーク内での磁気飽和が生じエアギャップ部の磁束密度がそれほど上げられないこと、高電流ではコイル発熱で耐久性に影響が出ること、

などから限界が有る。図 5-5 に VCM の入力電流ゼロのときの磁場解析例を示す。中心部ヨーク付近で既に磁束密度が飽和状態にあることが分かる。また入力電流に対する発生力は、入力電流方向に対して非対称である。図 5-4 はその解析結果及び実測データである。プラス入力電流側で発生力が飽和していることが分かる。図 5-6 から図 5-9 は、発生力算出の磁場解析結果で、それぞれ ± 3 及び 15A 入力時の磁束密度、磁束線図及びコイルに発生する推力を示す。油圧サーボ弁では、制御エッジ部から流れ出る作動流体による流体力が駆動アクチュエータの負荷としてかかってくるので、低発生力、発生力の非対称性は、安定な流量制御に好ましくない。スプール部の摺動抵抗も、低発生力のためにヒステリシス特性を悪化させる。またダンピング対策が必要で、安定した動作をさせるには、制御系での工夫も必要となる。

リニアフォースモーター (LFM、図 5-10) の発生力はボイスコイルモータ (VCM) に対し、電流やサイズに比べ大きな発生力が得られる。大きいものは 200N/A の発生力係数をもつ。ダンピング特性に優れ、安定性が良い。発生力が大きいことで入力電流も低く押さえられ、内蔵アンプ仕様も可能である。しかし可動鉄片形のため、固有振動数が低く、応答性に劣る点が欠点である。

圧電または電歪素子によるもの (図 5-11) は、駆動出力も大きく、応答性も良いが、変位が小さく、駆動電圧がかなり高くなるため、積層化構造による高変位化、低電圧駆動が必要となる⁽⁵⁻⁵⁾。欠点として数百 V の高駆動電圧が必要で、積層化にともなう接着部の信頼性、各層の電極部の信頼性に問題が生じる。たとえば密閉構造による信頼性向上等の対策が取られているものも有るが、大型化になったり、電気部と駆動部が分離できないなどのことが、油圧環境下での使用には適合しにくい。

5・3 超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁構成

超磁歪アクチュエータによる直動形サーボ弁では、高駆動出力、高応答、対環境性に優れ、コイルによる低インピーダンス駆動に適し、アクチュエータ構造がシンプル、等の特徴を持つことから、有望な駆動形式と考えられる⁽⁵⁻⁶⁾。

超磁歪アクチュエータのサーボ弁への応用研究は、ほとんど報告例はない。図 5-12 は、ヨーロッパの研究機関での開発例である⁽⁵⁻⁷⁾。油圧サーボ弁への応用では、超磁歪アクチュエータの変位はそのままでは不足なため、ここではこ方式による変位拡大を行っている。てこ比は 3 で設計し、約 0.3mm 変位で 300Hz の応答が得られている。しかし使用している超磁歪材料は直径 6mm 長さ 100mm の大きなもので、弁本体との大きさのバランスが悪く、まだ試作段階の設計で終わっている。

本研究においても、タンデム形アクチュエータ設計に至るまでに、4 つの試作を経てきている。

(1) 試作 1：直動形サーボ弁^{(5-8) (5-9)}

- (2) 試作 2: 同上、バイアス磁界入り超磁歪アクチュエータによる直動形サーボ弁⁽⁵⁻¹⁰⁾
- (3) 試作 3: 試作 2 のサーボ弁をパイロット弁とする 2 段形サーボ弁⁽⁵⁻¹¹⁾
- (4) 試作 4: 大小ベローズによる変位拡大機構入り超磁歪アクチュエータによる直動形サーボ弁⁽⁵⁻¹²⁾

各サーボ弁の構成を図 5-13 から図 5-16 に示す。

試作 1 は、(1)駆動部 (2)ボディスプール部 (3)位置検出部 (4)アンプ部 で構成される。(1)駆動部は、超磁歪材料(径 6mm、長さ 50mm)、コイル(外径 22mm、内径 10mm)、ヨーク、プランジャーより成る。コイルに電流を流すことで磁界が発生し、それにより超磁歪材料が伸び、その伸びがプランジャーを介しスプール弁に伝達する。従って、コイルに流れる電流値によりスプール弁の位置が決まり、作動油の流れる方向や流量がコントロールされる。熱膨張キャンセル機構も、すでに説明した手法で取り入れている(図 5-17)。スプール弁の変位は、(3)位置検出部の LVDT により検出され、フィードバック信号に用いられる。アンプ部で PI (比例+積分) 制御する事で、入力電流対スプール変位 (または流量) の線形化を計っている。プラスマイナス駆動を目的にバイアス磁界をかけるのには、バイアス電流を用いている。図 5-18 は試作 1 サーボ弁の周波数及び過渡応答特性を、表 5-1 はこの弁の仕様を示す。しかしこの方式では弁中立位置保持にエネルギーを消費するため、省エネ化には向かない。そこでバイアス磁界用に、永久磁石を取り入れたものが試作 2 である (超磁歪アクチュエータ部磁気設計に関しては、第 3 章参照)。いずれも 2 L/min の流量レベルで約 600Hz の応答性を得ており、従来のノズルフラップ形サーボ弁の特性(約 300Hz)を上回るデータが得られた(図 5-19、表 5-2)。

しかし、この流量では使用できる応用範囲が限られるため、流量アップをめざし開発したものが試作 3 および 4 である。試作 3 は、試作 2 の直動形サーボ弁をパイロット弁とする 2 段形サーボ弁である(図 5-21)。65L/min レベルの流量を約 300Hz で駆動できる(図 5-20、表 5-3)。しかしパイロット弁駆動アクチュエータ、すなわち超磁歪アクチュエータ部が全体設計からすると長く飛び出しており、装置への取り付けや、取り扱いに注意を要する。出来れば弁本体に組み入れられるような設計とし、振動にも強い構造が望ましい。

試作 4 は大小ベローズによる変位拡大(図 5-22)をした超磁歪アクチュエータで構成したサーボ弁である。リン青銅製の、径の異なる 2 つのベローズを同心状に設置し、内外 2 つの密閉容積を形造る。ストローク増幅をつかさどるのは、内側容積である。ここに液体 (今回は水グリコール系作動油) を封入し、右側フランジ側断面積と左側小フランジ断面積との比でストロークを増幅する。右側フランジに超磁歪アクチュエータを接合し、右側フランジを動かし、その量を増幅して、左側小フランジストロークをとりだす。ここでの増幅量設計値は 5 倍である。

内外ベローズ間の容積には、圧縮空気を封入する。これは、超磁歪材料がある圧縮荷重負荷下で歪が最大になる性質から、設計されたものである。すなわち、超磁歪材料に最適な圧縮荷重が負荷されるよう空気圧を調整する。

本サーボ弁は、図 5-16 のように (1) 超磁歪アクチュエータ (2) ストローク増幅機構部 (3) ボディスプール部 (4) 位置検出部から成る。

コイルに電流を流すことで磁界が発生し、それにより超磁歪材料が伸縮し、それがストローク増幅機構部右側フランジを動かす。ここでストロークが増幅され、スプールに伝達される。従って、コイルに流れる電流値によりスプール位置が決まり、作動油の流れる方向、流量が制御される。

スプール弁変位は、位置検出部の LVDT により検出され、フィードバック信号に用いられる。本試作弁もアンプ部にて PI(比例+積分)制御することで、入力電流対スプール変位の線形化を図っている。また、ダンピング対策として、スプール速度フィードバックも行っている。

本ダイレクトドライブサーボ弁(試作 4)の特性は、以下の通りである。

- (1) スプールのストローク : $164\ \mu\text{m}$
- (2) 定格流量 : 約 6L/min
- (3) ヒステリシス : 0.5% 以下
- (4) スレッシュホールド : 0.5% 以下
- (5) ステップ入力応答時間 : 約 1ms (100%入力時)
- (6) 周波数応答 : 250Hz (ゲイン $\cdot 3\text{dB}$)
 180Hz (位相遅れ 90°)
- (7) 定格入力電流 : 0.6A

図 5-23 は線形化されたスプール弁の変位特性(静特性)の実測例である。このように、PI 制御により、サーボ弁として必要なヒステリシスの低減化と線形化を図った。

図 5-24 は流量特性である。流量の大きいところを除いて、直線性も良い。高流量域での飽和が少し見られるが、これはフローフォース(定常流体力)と超磁歪アクチュエータの出力特性との兼ね合いによるものと思われる。フローフォースは、ストローク増幅機構部を逆に伝わり、力が拡大されてアクチュエータに負荷される。また超磁歪材料の出力特性には、伸びが大きくなると共に低下する垂下特性があるため流量飽和現象が生じる。

図 5-25 は周波数応答及び過渡応答特性を示す。周波数応答は、入力信号対スプール位置信号を測定したもので、入力信号は $\pm 0.6\text{A}$ のサイン波である。ゲインが 3dB となる周波数は 250Hz 、位相遅れが 90° となる周波数は 180Hz と期待より大きく下回った。過渡応答も、 $0\sim 0.6\text{A}$ 入力に対するスプール位置信号を記録したものである。応答自身は約 1ms と早く、安定性も良い。以上のように、アクチュエータのダンピング特性は必ずしも良くないため、高速作動特性は目標を達成できなかった。機械構造的に共振点を回避する設計が必要と思われるが、本構造では不可能となっている。

5・4 タンデム形超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁

以上のように、試作 1 から 4 では、市場の要求する直動形サーボ弁特性を得ることが出来なかった。そこで、本研究で開発したタンデム形超磁歪アクチュエータをサーボ弁駆動に応用し、特性を調べた⁽⁵⁻¹³⁾。

図 5-26 は、今回開発した 2 段形サーボ弁の構造図である。タンデム形超磁歪アクチュエータ部、パイロット段スプール・スリーブ部、メイン段スプール・スリーブ部、位置検出センサー等で構成される。

パイロット段スプール駆動に、すでに第 3 章および 4 章で説明したタンデム型超磁歪アクチュエータ用い、直動化した。パイロットスプール位置は非接触位置センサーで検出し、閉ループ制御(PI 制御)により、線形化を図った。

パイロット段のコントロールポートをメイン段スプール弁の両端に接続し、メイン段スプール弁を油圧駆動する。こちらは LVDT により位置を検出、同じく閉ループ制御 (PID 制御：比例+積分+微分制御) している。バルブ外形寸法は、80x86x80mm に押さえ、小型化した。

メイン段スプール最大ストロークは約±1mm、最大流量は 50L/min (弁圧損 7MPa) が得られた。またヒステリシス、スレッシュホールド共、サーボ弁としての性能を十分満足している。図 5-27 に、2 段弁の 100%入力 (50L/min レベル) での周波数応答を示す。90° 位相遅れ点で約 400Hz、振幅-3dB 点で約 200Hz が可能となった。今までのノズルフラップ型サーボ弁の特性を、大きく上回る性能が得られた。過渡応答応答時間も約 2msec 程度と早い (表 5-28)。

以上より、タンデム形超磁歪アクチュエータによる、2 段形サーボ弁を開発し、最大流量 50L/min サイズにおいて、振幅比-3dB 及び位相遅れ 90° の応答周波数がそれぞれ 200Hz 及び 400Hz と、直動形サーボ弁としてはこれまでにない高応答化を達成できた。

第5章参考文献

- (5-1) 桑野、松下、オブザーバーによる直動型サーボ弁の高性能化、油圧と空気圧、15-2(1984)、18-25
- (5-2) 赤坂、中村、安成、尾原、金子、直動形サーボ弁による圧下シリンダの動特性、日本機械学会論文集 C、60-579(1994)、3835-3840
- (5-3) Teutsch, H., Electromagnetischer Linearmotor für direkt betätigte Servoventile, O+P, 34-11(1990), 754-761
- (5-4) 内野、圧電／電歪アクチュエータ、森北出版(1986)、160
- (5-5) 一柳、バルブはどう電子制御されるか(5)、パワーデザイン、29-3(1991)、85-91
- (5-6) 田中、油空圧機器のための電気－機械インターフェース、油圧と空気圧、22-1(1991)、19-56
- (5-7) Goodfriend, Swell, Jones, Application of a Magnetostrictive Alloy, Terfenol-D Direct Control of Hydraulic Valves, Edge Technologies Inc., (1990)
- (5-8) 浦井隆宏・杉山高洋・中村孝・神保勝久, 超磁歪材料を用いたダイレクトドライブ油圧サーボバルブの開発, 日本機械学会論文集 C、59-563 (1993)、2112-2115.
- (5-9) T.Urai and T.Sugiyama, Development of a direct drive servo valve using a giant magnetostrictive material, 2nd JHPS International Symposium on Fluid Power (Sep.1993)
- (5-10) 平塚和人・浦井隆宏, 超磁歪アクチュエータの磁気回路設計およびダイレクトドライブサーボ弁への応用, 日本機械学会論文集 B、60-570 (1994)、479-483
- (5-11) 浦井隆宏、超磁歪材料を用いた高速ダイレクトドライブサーボ弁の開発、平成6年春季油空圧講演会論文集(1994)、17-20
- (5-12) 浦井隆宏, ストローク増幅機構付き超磁歪アクチュエータを用いたサーボ弁の試作, 日本AEM学会誌 3-1 (1995)、46-49.
- (5-13) 浦井隆宏・田中裕久, タンデム型超磁歪アクチュエータの開発とサーボ弁への応用, 日本油空圧学会論文集 (投稿中、32-3(2000年5月)に掲載予定).

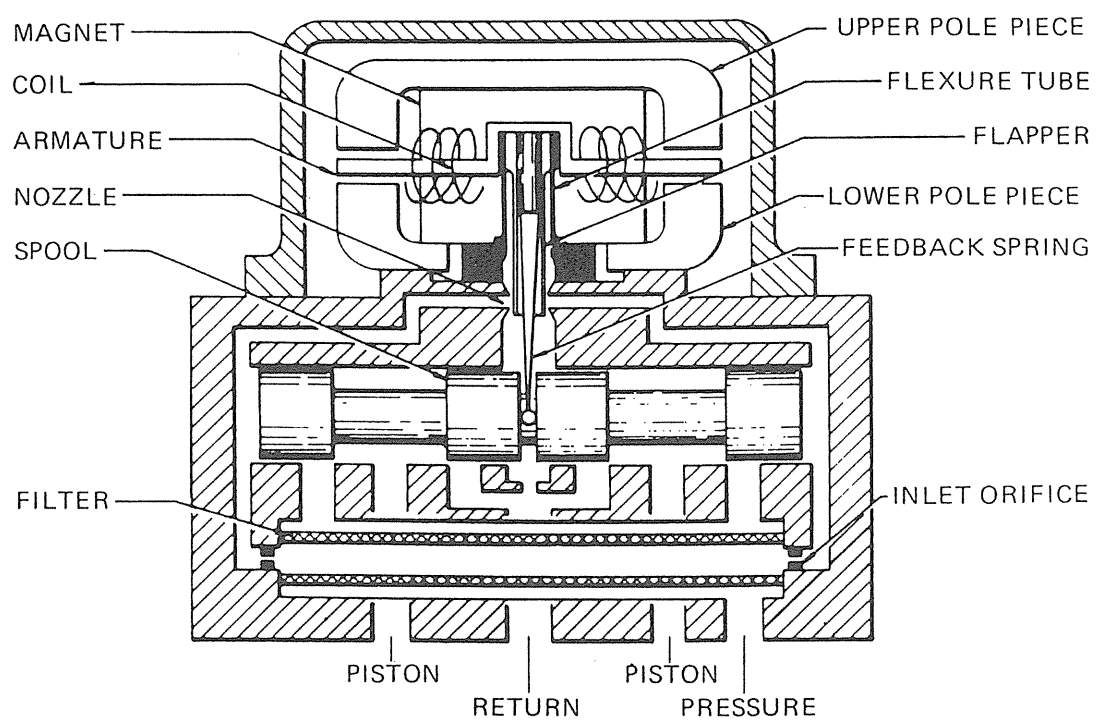


図 5-1 ノズルフラップ形サーボ弁

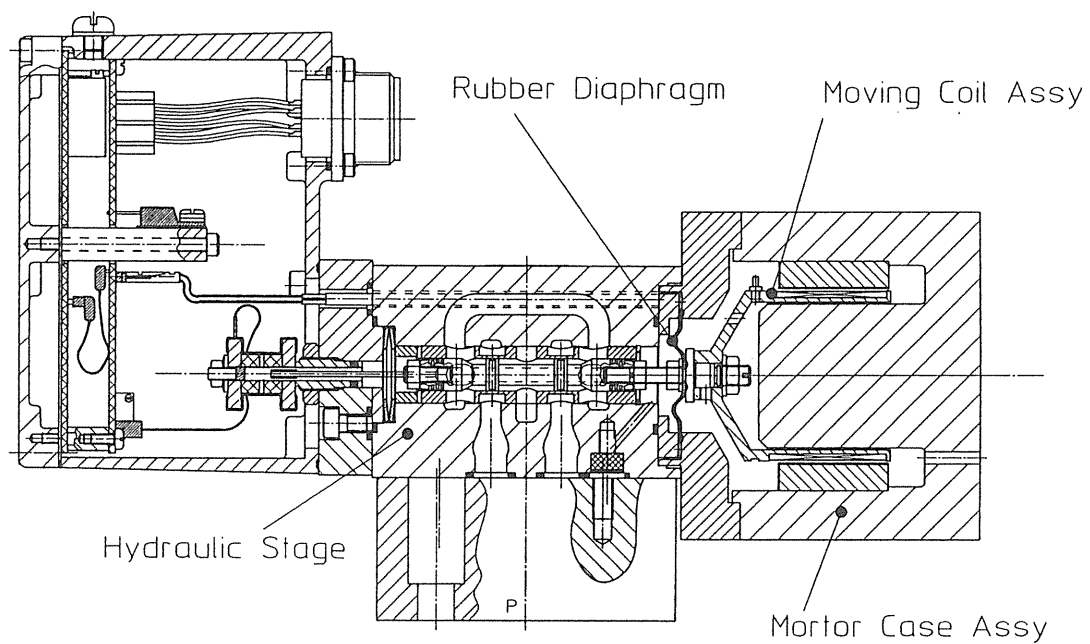


図 5-2 ボイスコイルモータ駆動サーボ弁

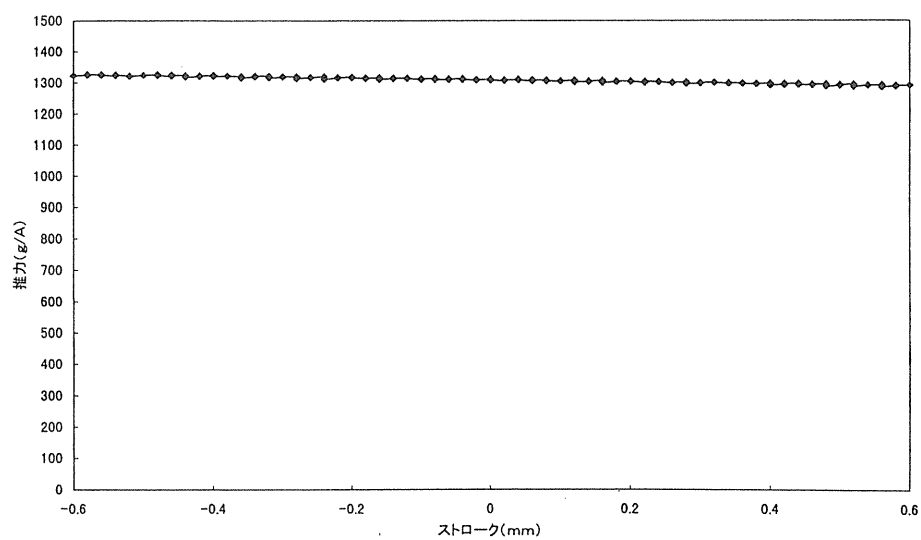


図 5-3 ボイスコイルモータ発生推力特性 (入力電流一定)

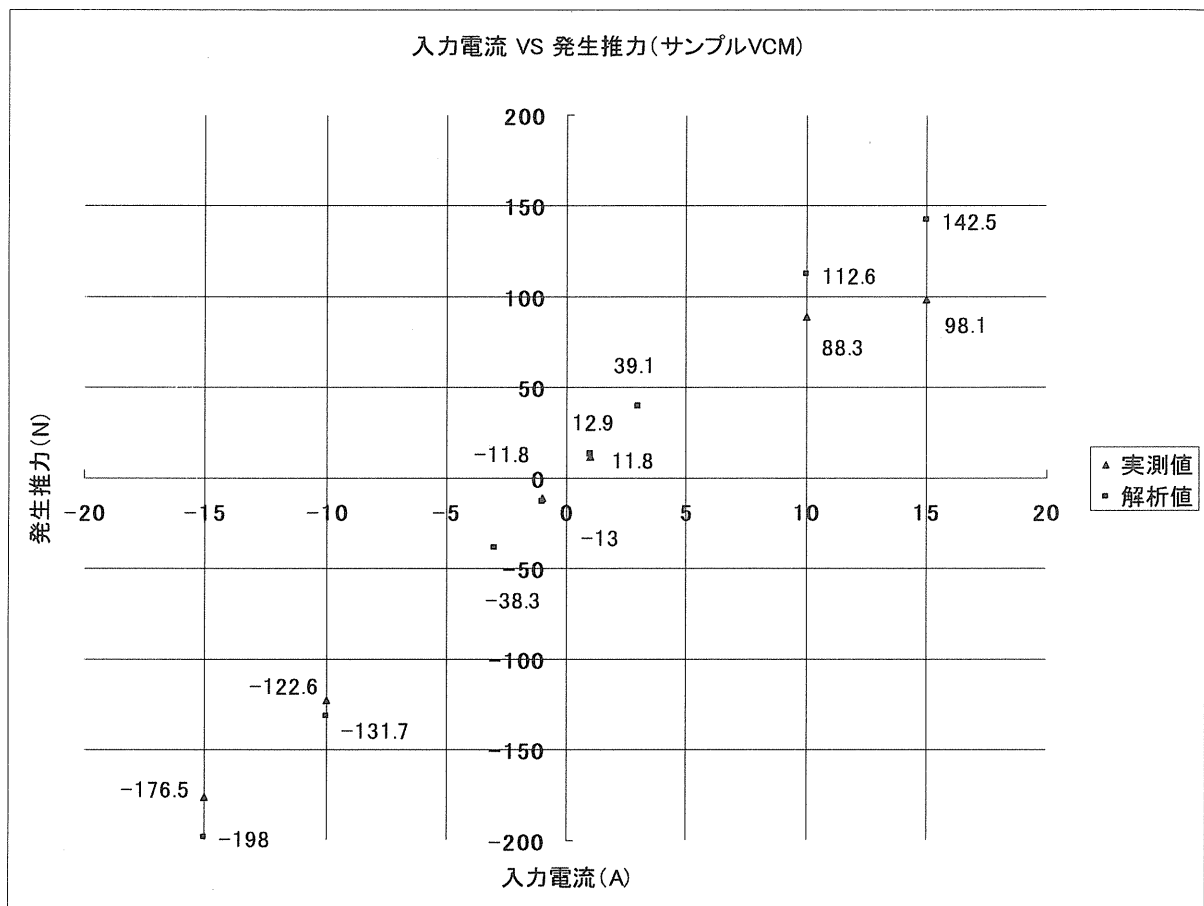
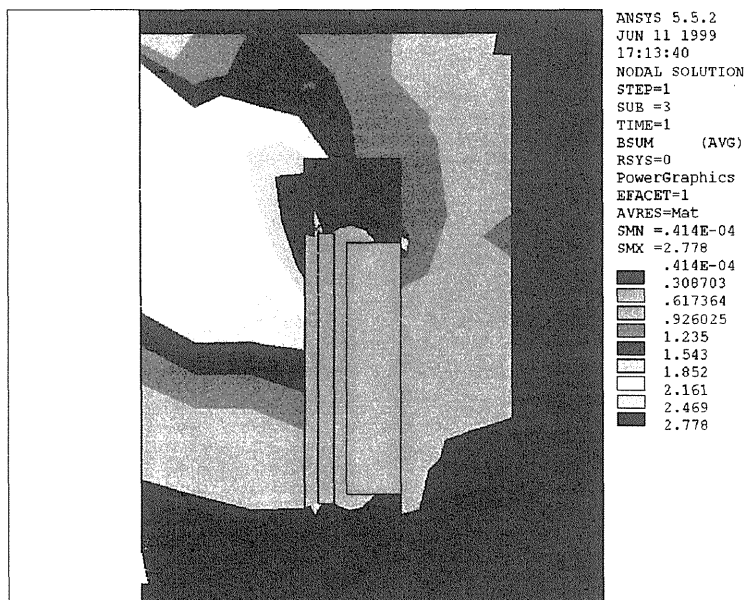
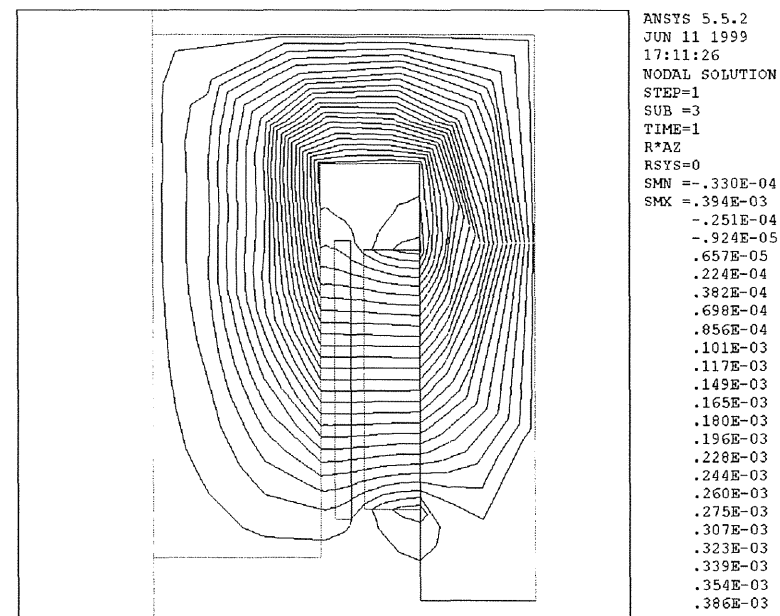


図 5-4 ボイスコイルモータ発生推力 (入力電流の影響)

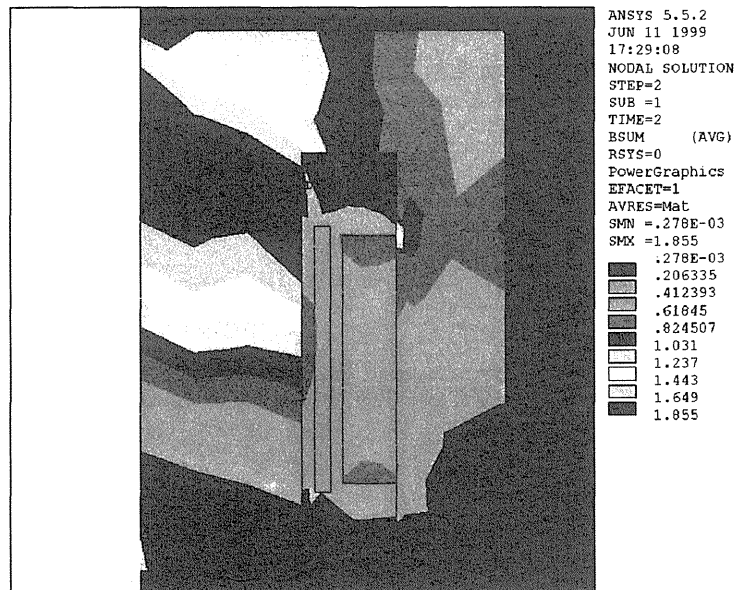


(a) 磁束密度

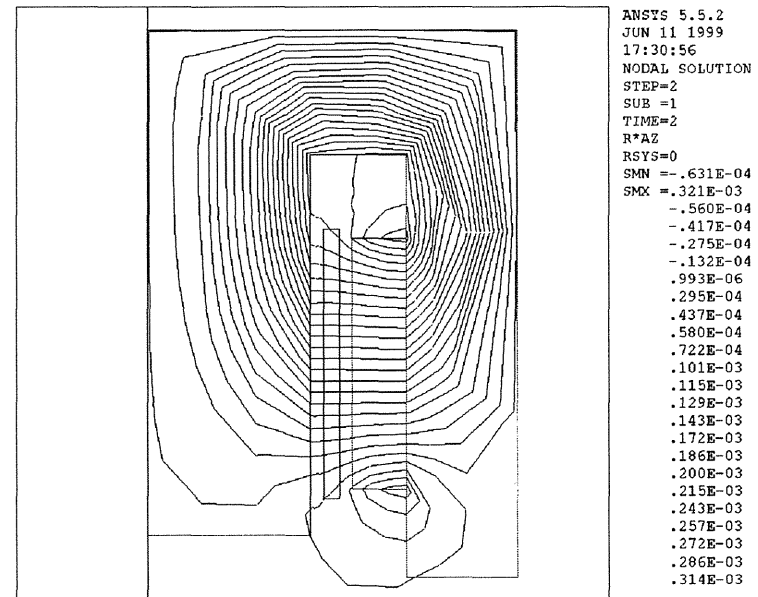


(b) 磁束線図

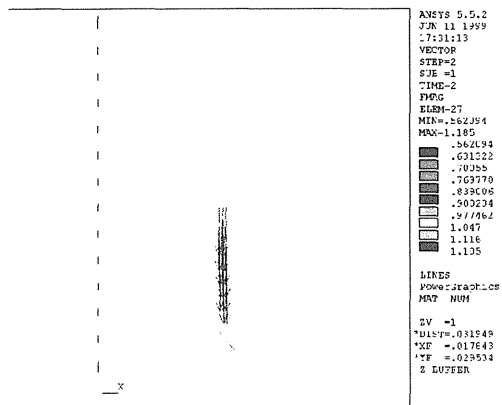
図 5-5 ボイスコイルモータ磁場解析例 (入力電流 = 0 A)



(a) 磁束密度

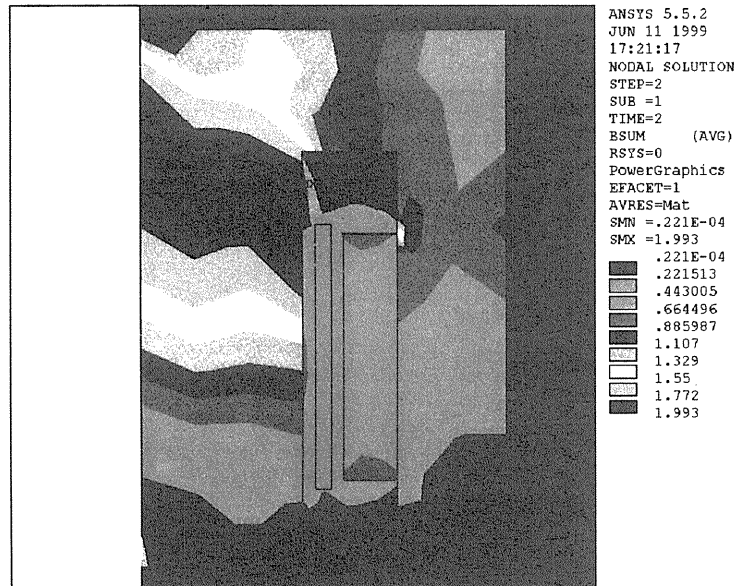


(b) 磁束線図

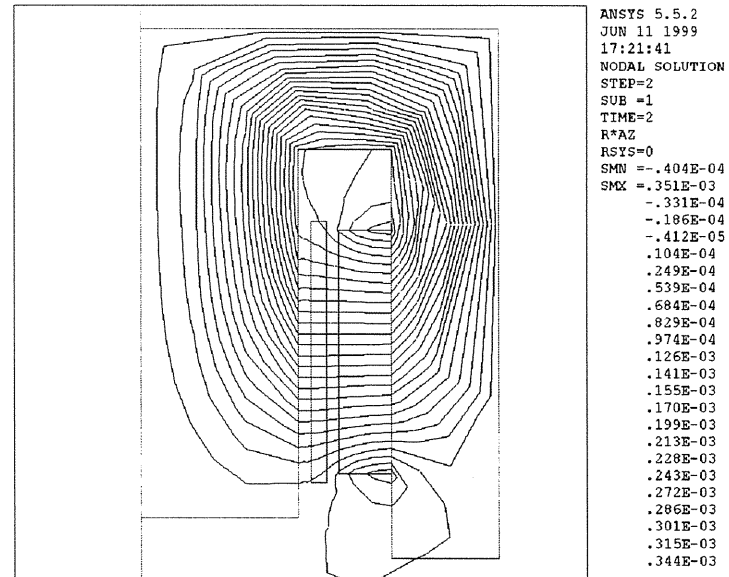


(c) 発生推力

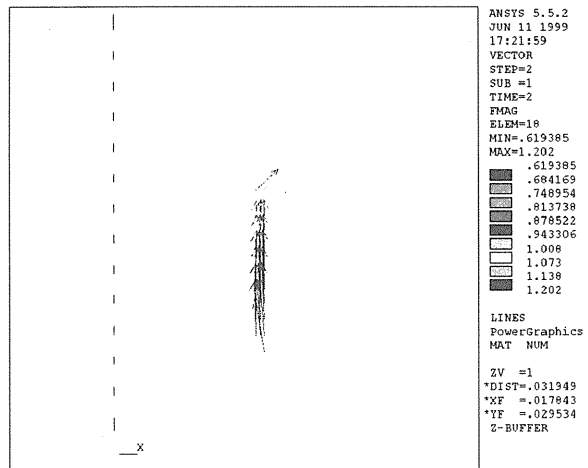
図 5-6 ボイスコイルモータ磁場解析例 (入力電流=+ 3 A)



(a) 磁束密度

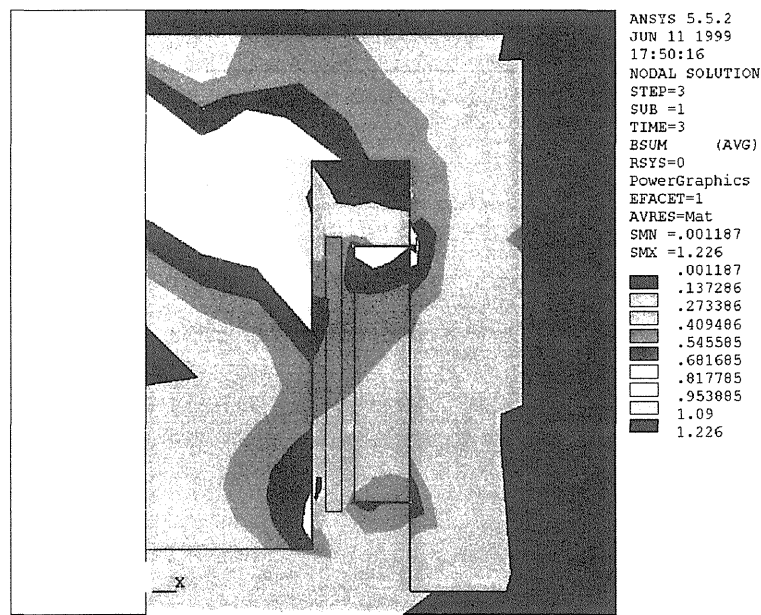


(b)磁束線図

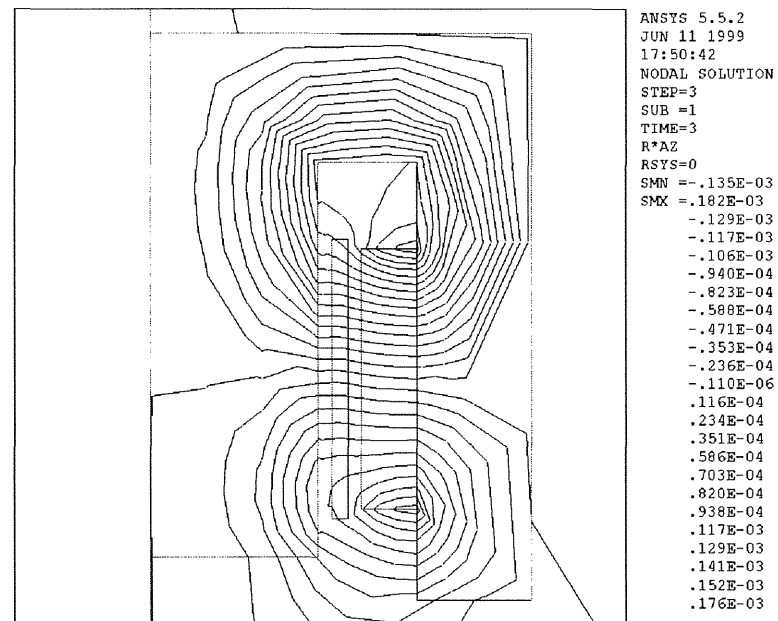


(c) 発生推力

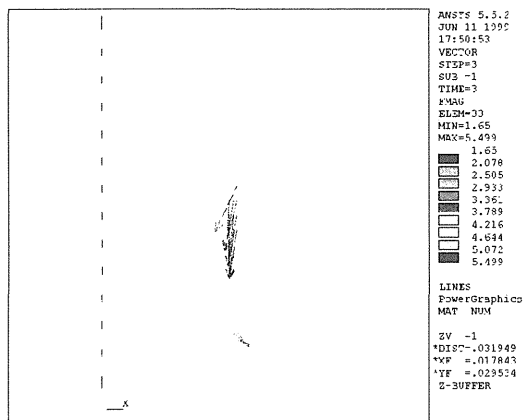
図 5-7 ボイスコイルモータ磁場解析例 (入力電流=-3 A)



(a) 磁束密度

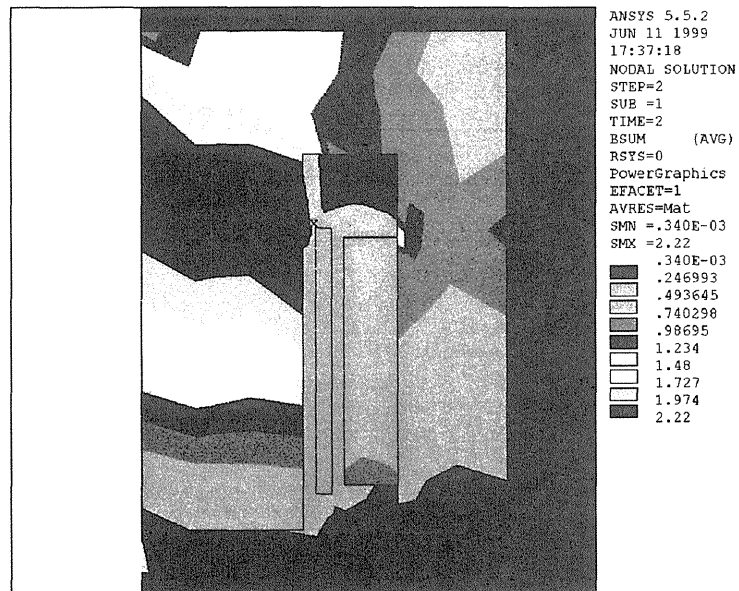


(b)磁束線図

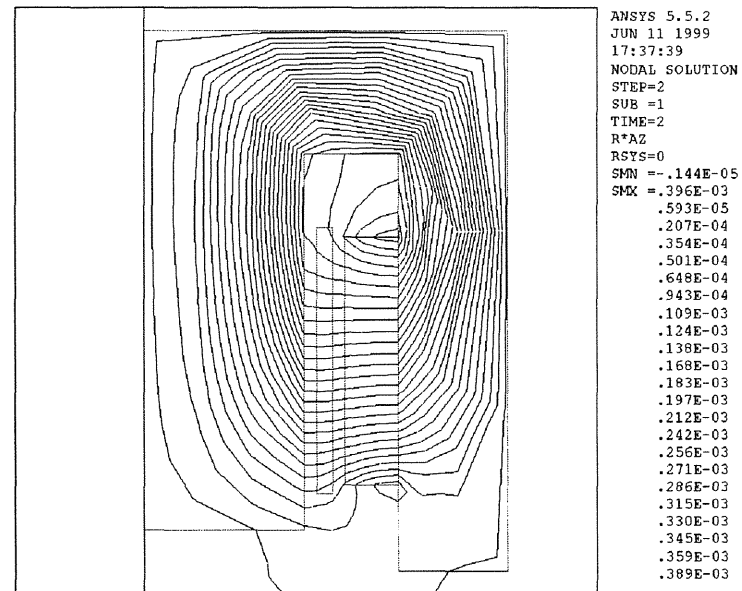


(c) 発生推力

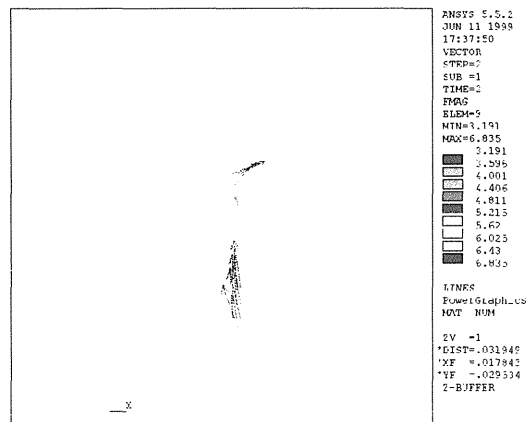
図 5-8 ボイスコイルモータ磁場解析例 (入力電流=+15A)



(a) 磁束密度



(b) 磁束線図



(c) 発生推力

図 5-9 ボイスコイルモータ磁場解析例 (入力電流=-15A)

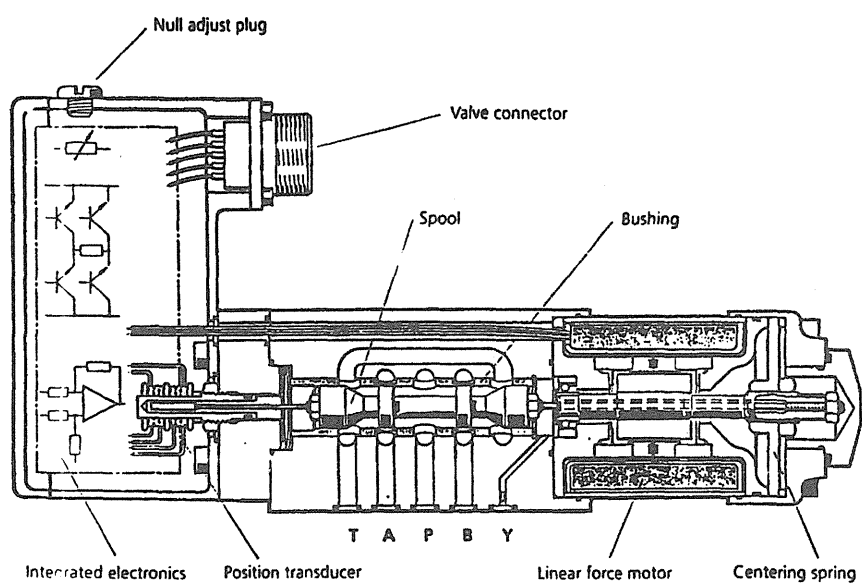


図 5-10 リニアフォースモータ駆動サーボ弁

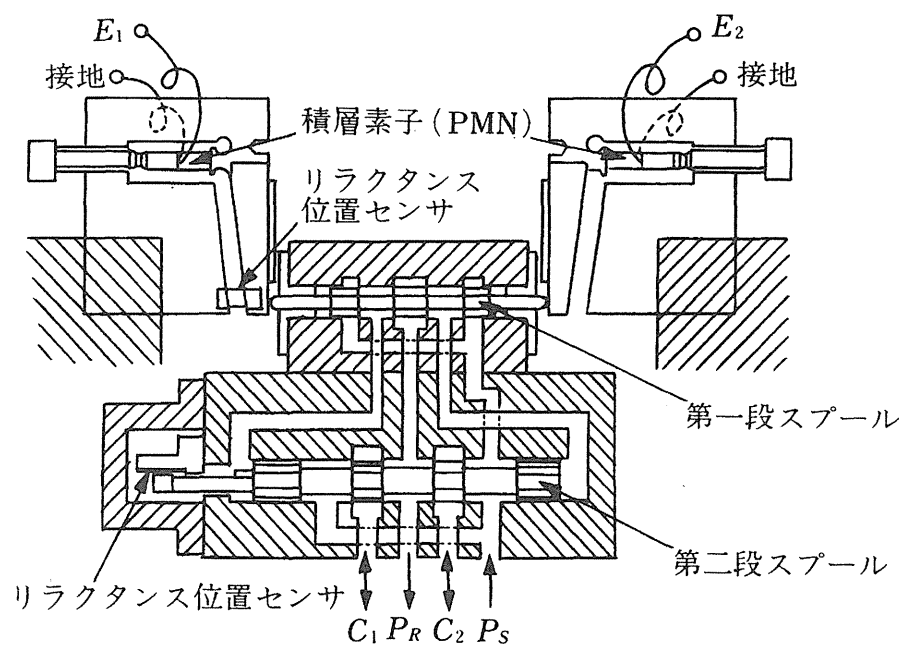


図 5-11 圧電素子駆動サーボ弁

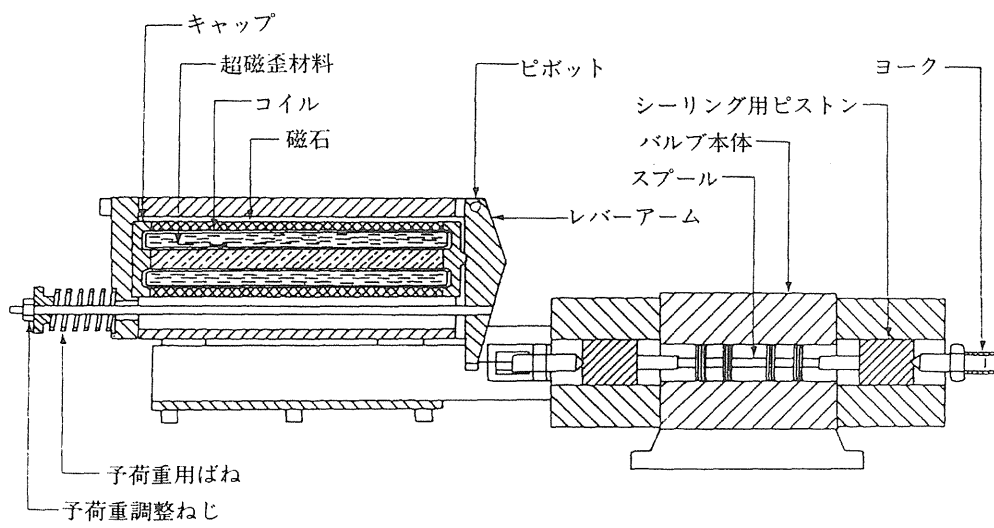


図 5-12 超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁例

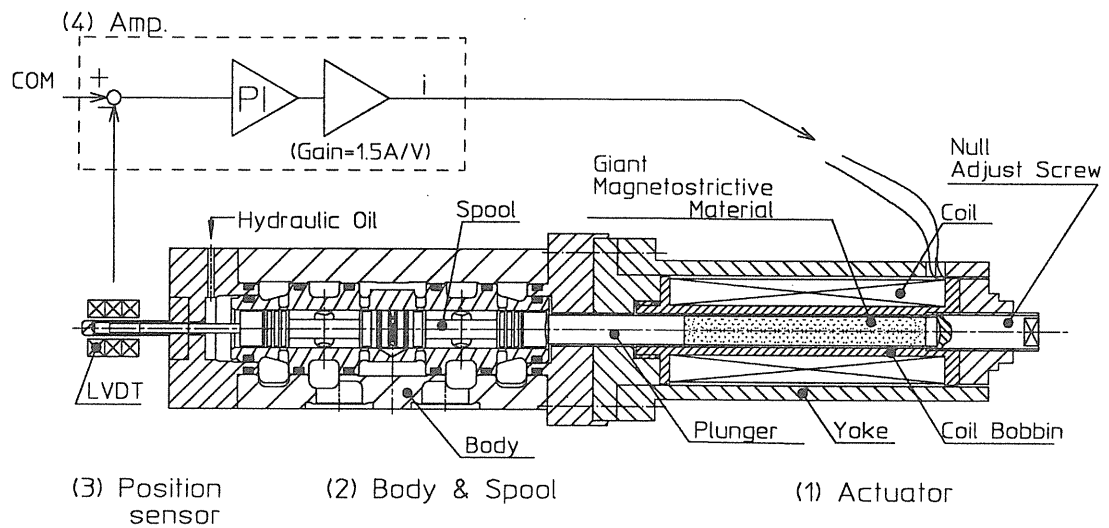


図 5-13 超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁(試作 1)

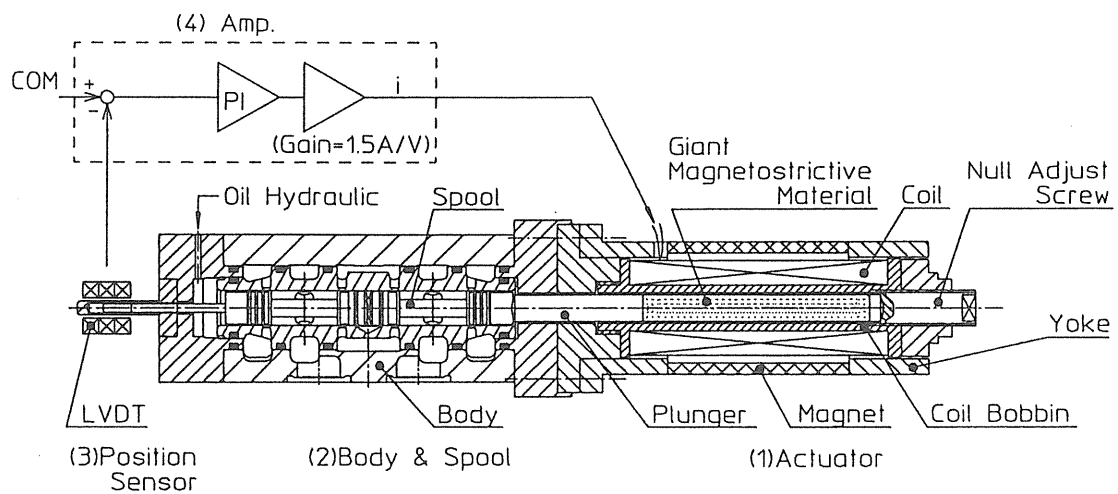


図 5-14 超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁(試作 2、バイアスマグネット入り)

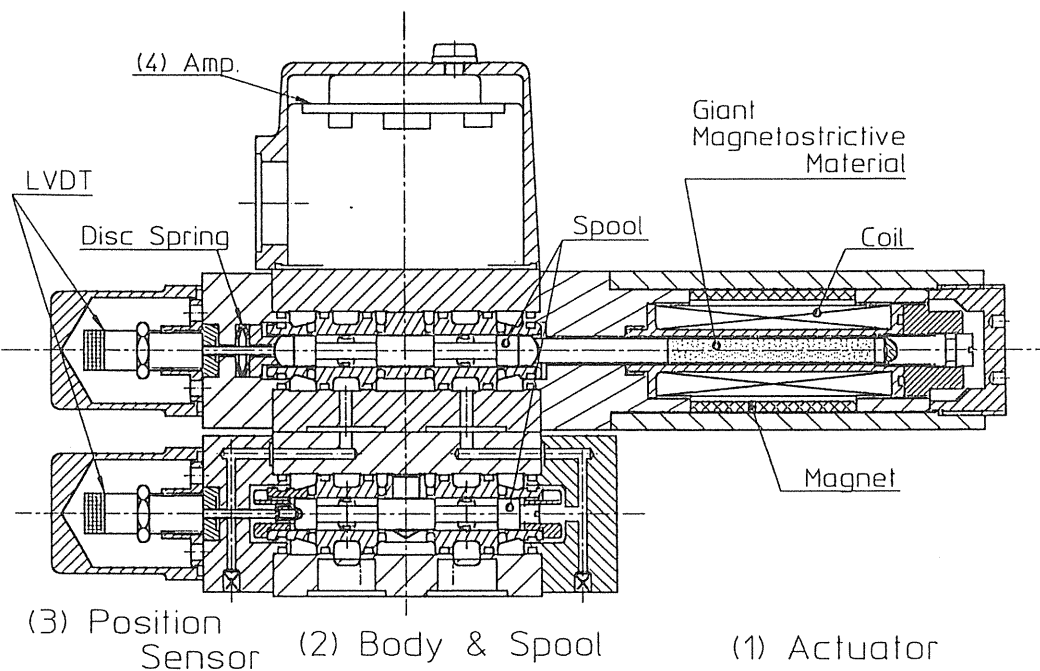


図 5-15 超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁(試作 3、2 段階形)

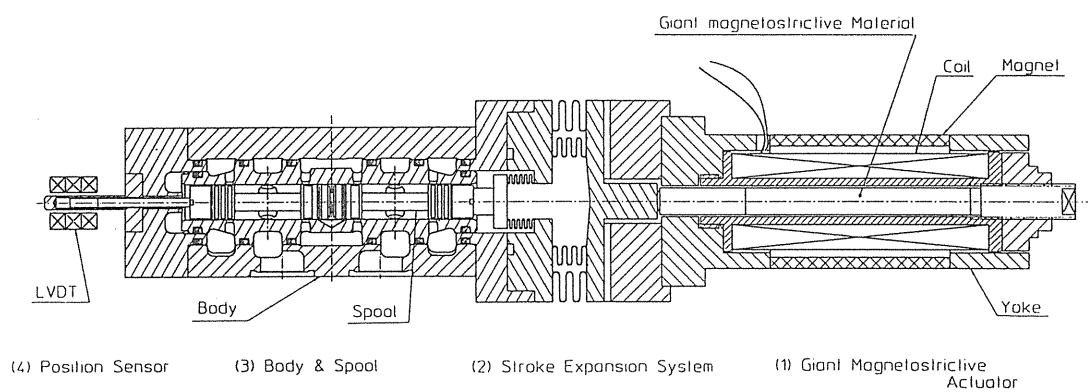


図 5-16 超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁(試作 4、大小ベローズ変位拡大式)

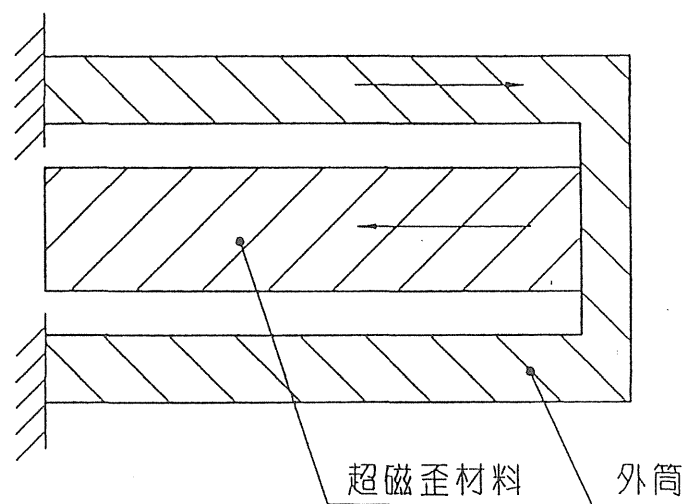


図 5-17 温度膨張キャンセル機構（試作 1 から 4）

表 5-1 弁仕様(試作 1)

Spool Stroke	54 μm max
Rated Flow	2 l/min max
Hysteresis	< 0.2 %
Threshold	< 0.1 %
Linearity	< 2% (from flow curve)
Step response	< 1ms(@100% input)
Frequency response	650Hz @-3dB 600Hz @90° P.L. (@100% input)
Rated input command	0 ~ 0.6 V
Max input current	1.3A, 32Vrms(@400Hz)

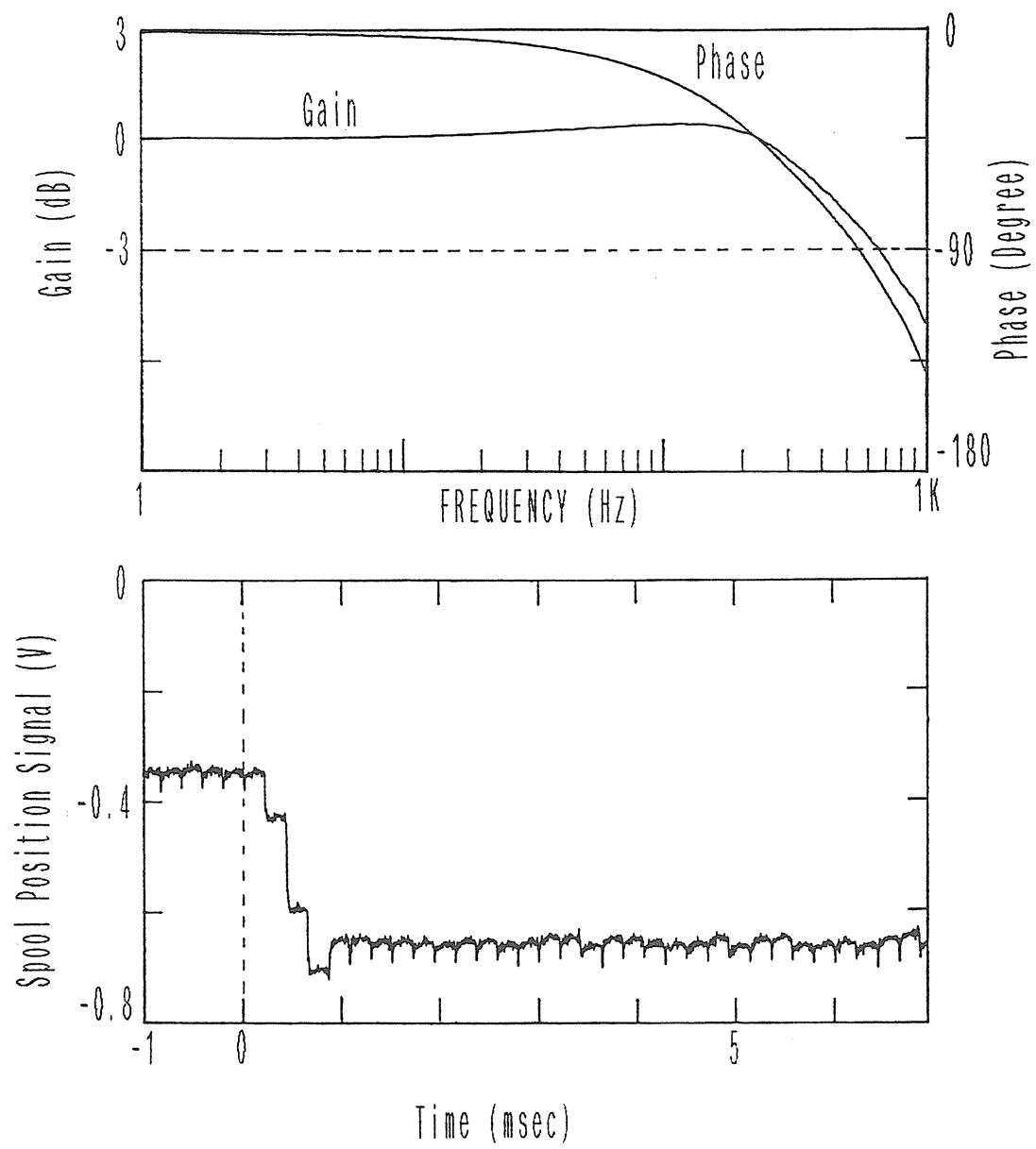


図 5-18 周波数及び過渡応答(試作 1)

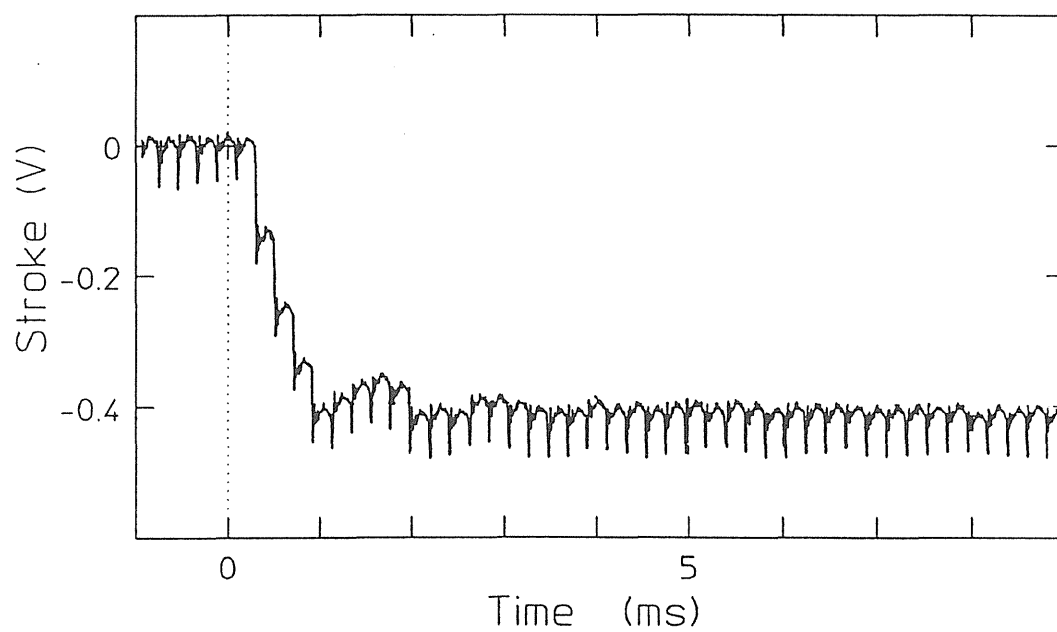
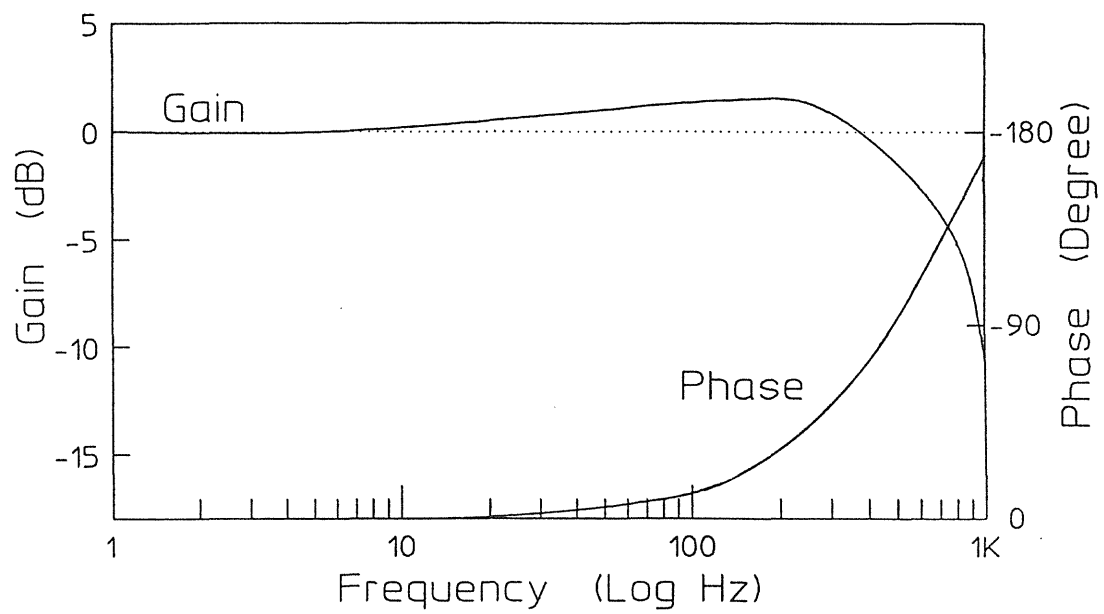


図 5-19 周波数及び過渡応答(試作 2)

表 5-2 弁仕様(試作 2)

Spool Stroke	approx. 50 μm
Rated Flow	approx. 2 l/min max
Hysteresis	$\leq 0.2 \%$
Threshold	$\leq 0.1 \%$
Linearity	$\leq 2\%$ (from Flow Plot)
Step Response	approx. 1 ms @100% Input
Frequency Response	approx 630 Hz @-3dB approx 450 Hz @90° PL @100% Input
Rated Voltage	$\pm 0.4 \text{ V}$

表 5-3 弁仕様(試作 3)

Rated pressure	14 MPa
Rated input	$\pm 3.5 \text{ V}$
Rated flow	65 L/min
Spool stroke	$\pm 0.96 \text{ mm}$
Leakage	2.2 L/min
Threshold	$< 0.1 \%$
Hysteresis	$< 0.3 \%$
Frequency response	$> 300 \text{ Hz @-3dB}$
(@14 MPa $\pm 100\%$ IN)	320 Hz @90° PL

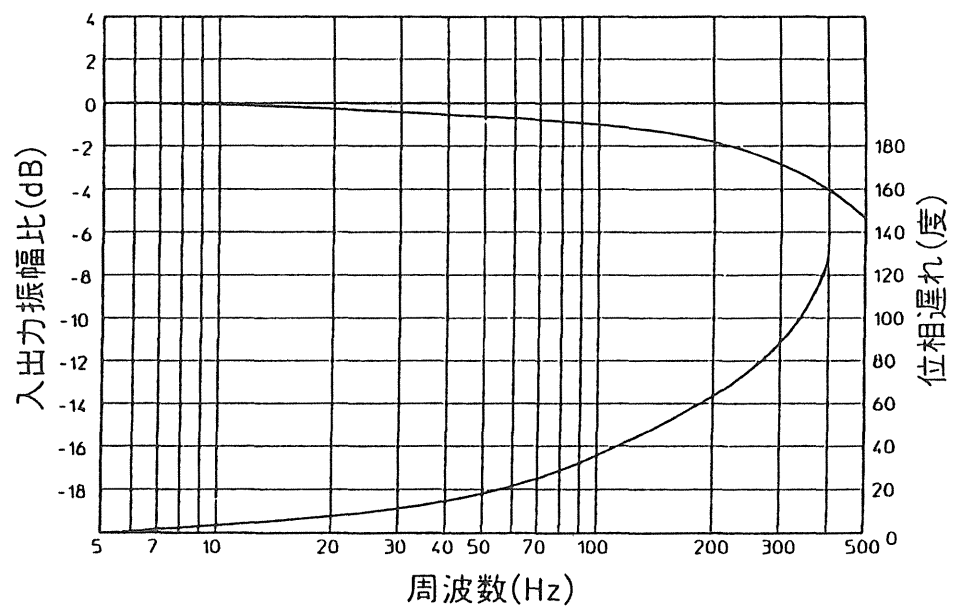


図 5-20 過渡応答(試作 3)

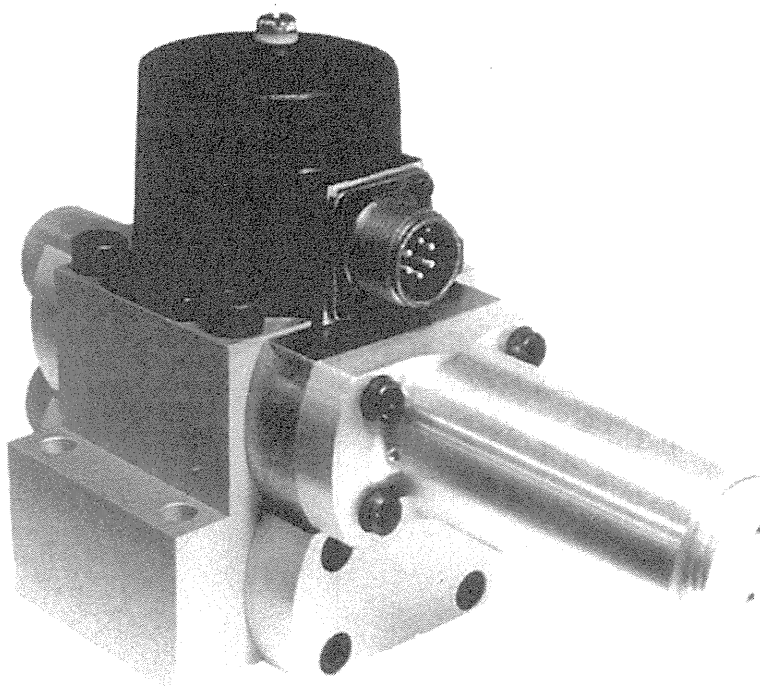


図 5-21 試作 3 サーボ弁外觀

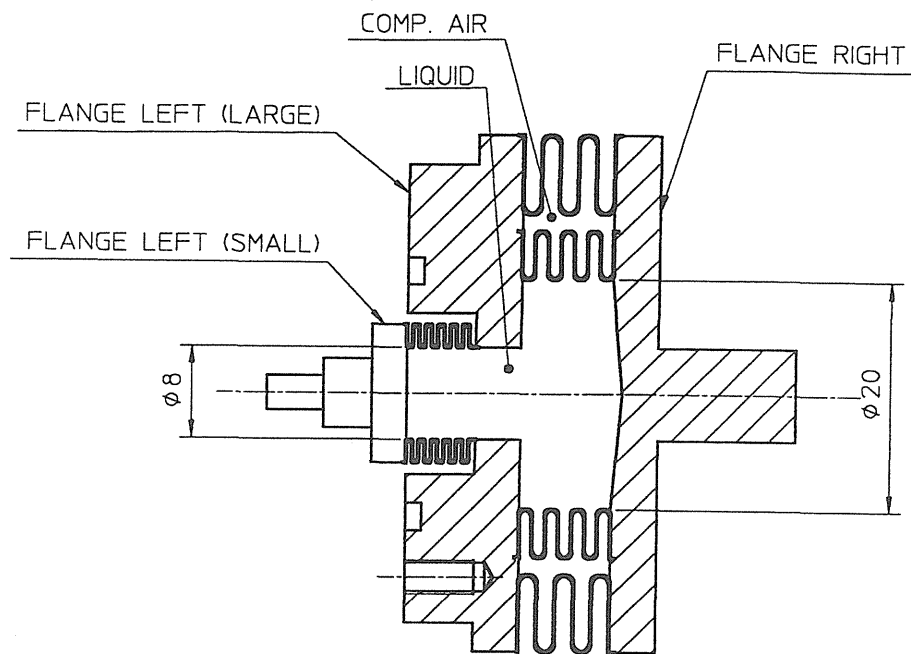


図 5-22 大小ベローズ変位拡大機構

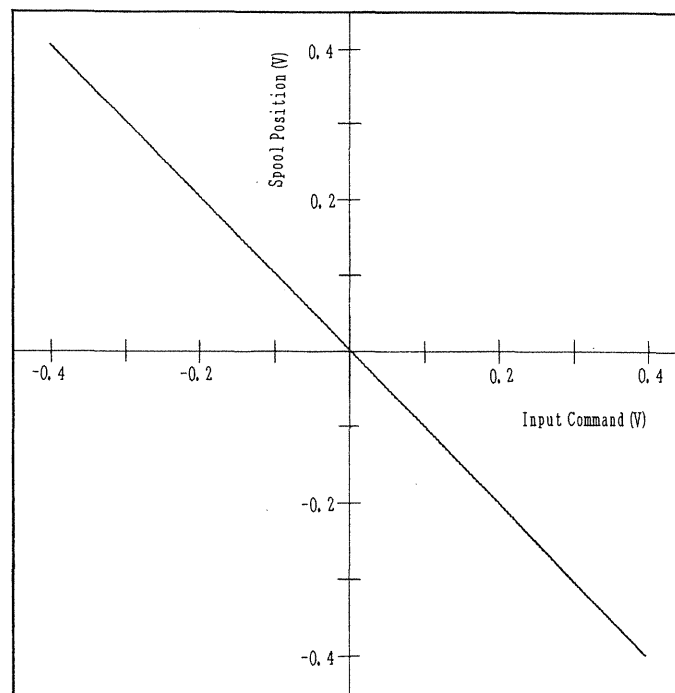


図 5-23 弁変位特性(試作 4)

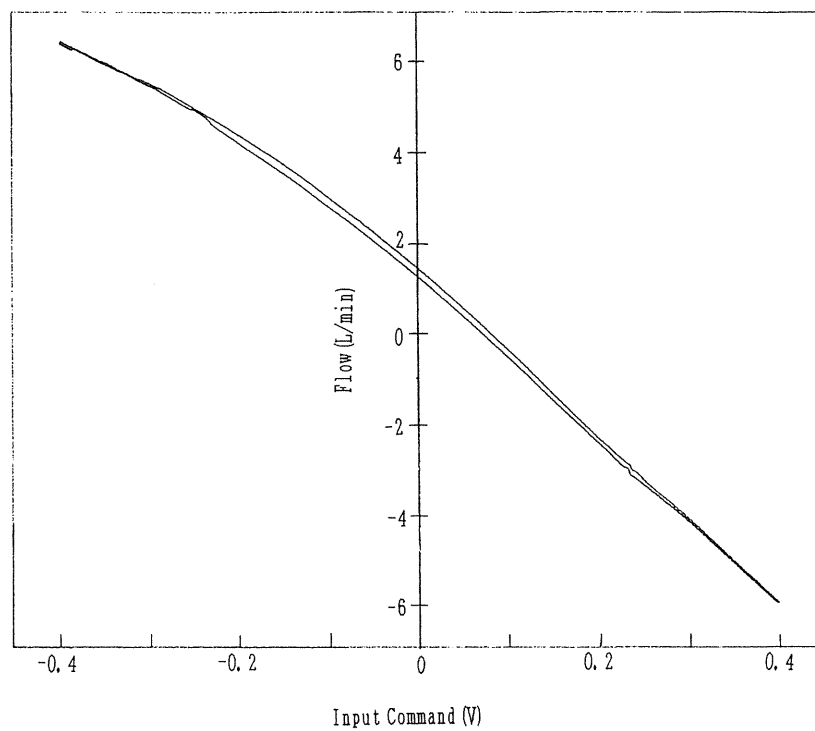


図 5-24 弁流量特性(試作 4)

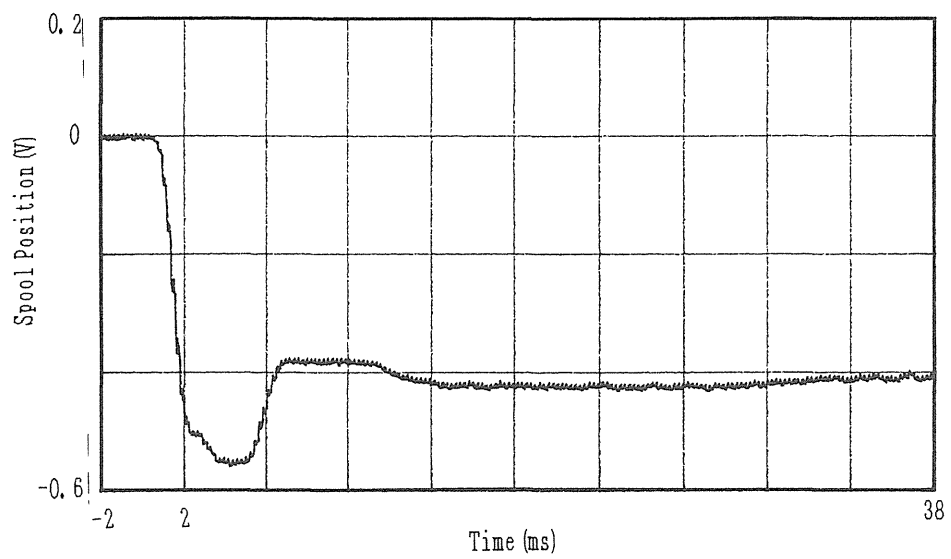
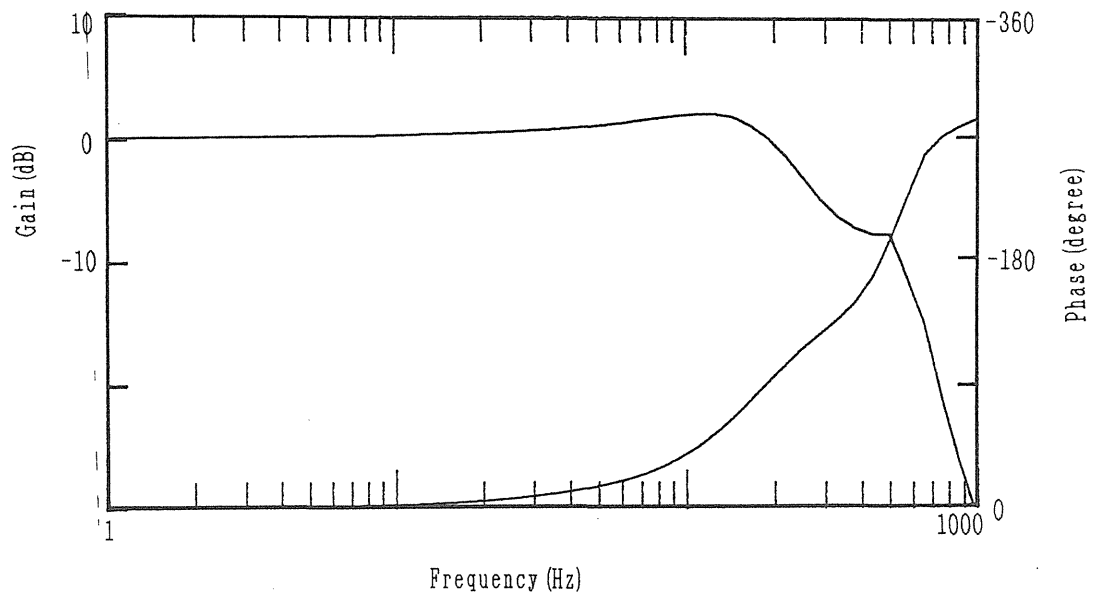


図 5-25 周波数及び過渡応答(試作 4)

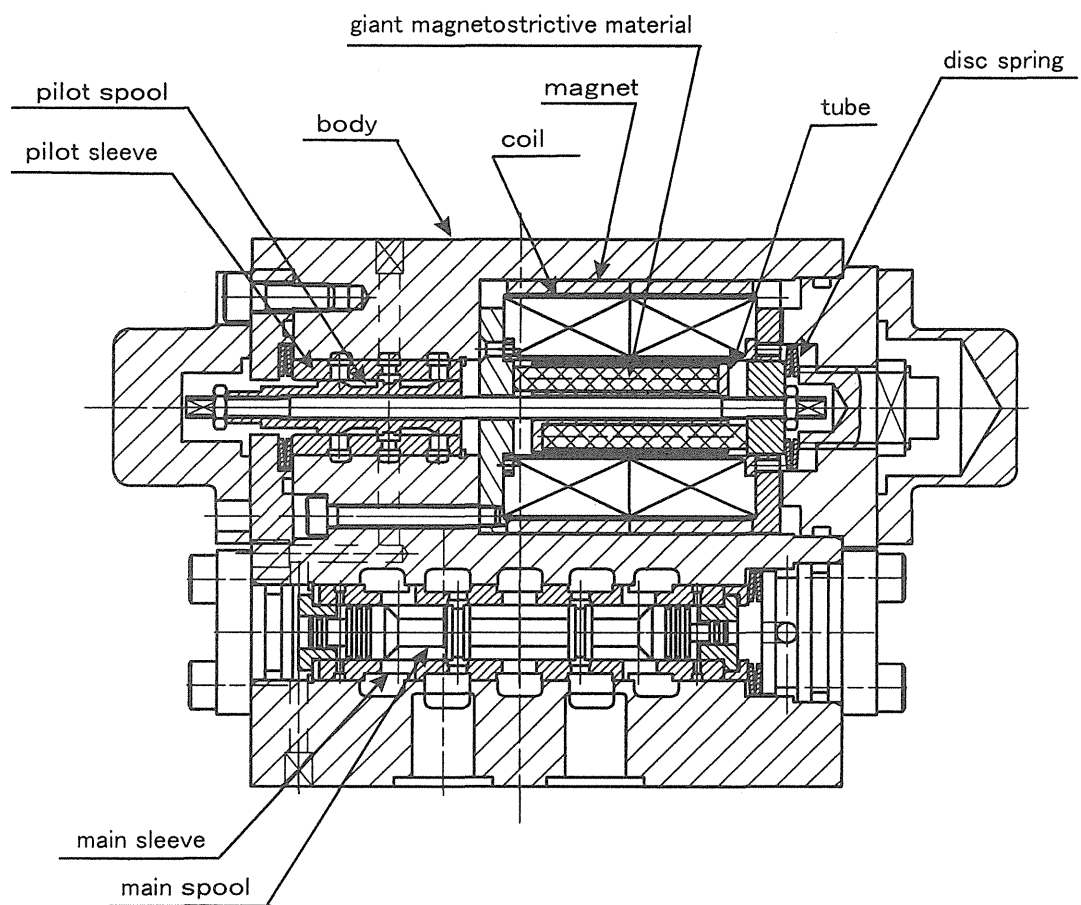


図 5-26 タンデム形超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁

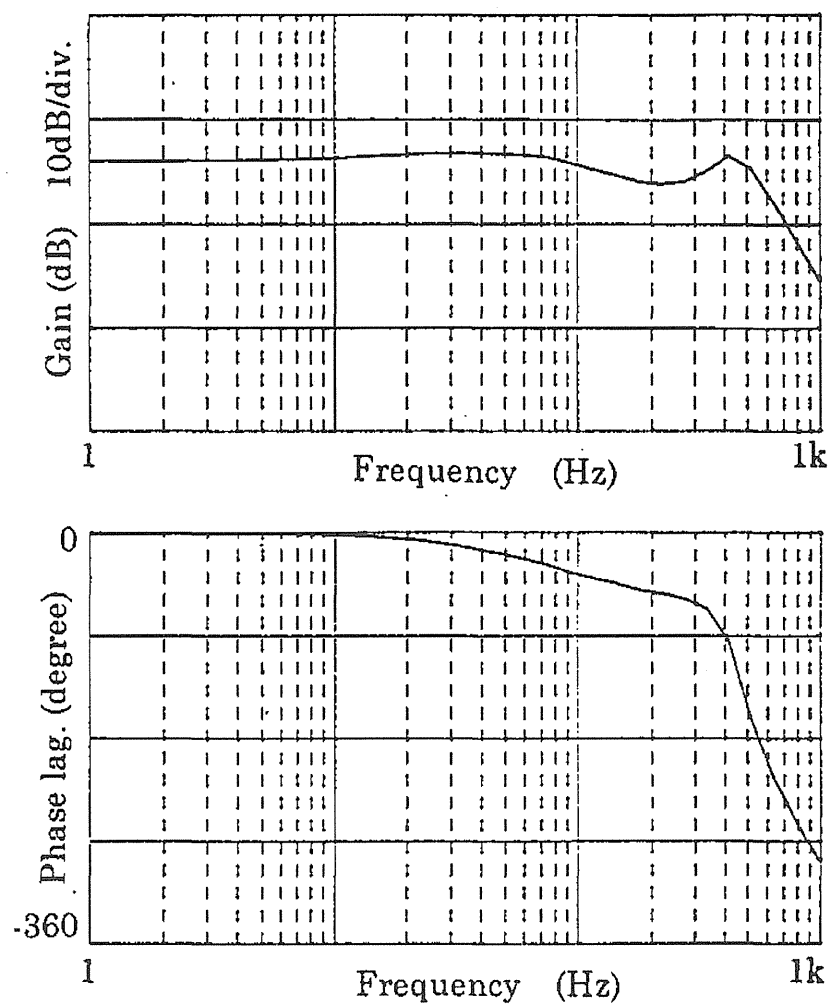


図 5-27 周波数応答(タンデム形超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁)

表 5-4 弁仕様(タンデム形超磁歪アクチュエータ駆動)

Max Stroke	± 1mm
Flow	50L/min @7MPa valve drop
Frequency Response (closed loop, ± 1mm) @ -3dB / 90° phase Lag	200Hz / 400Hz
Step response	2msec @0~1mm stroke
Max Current	2A

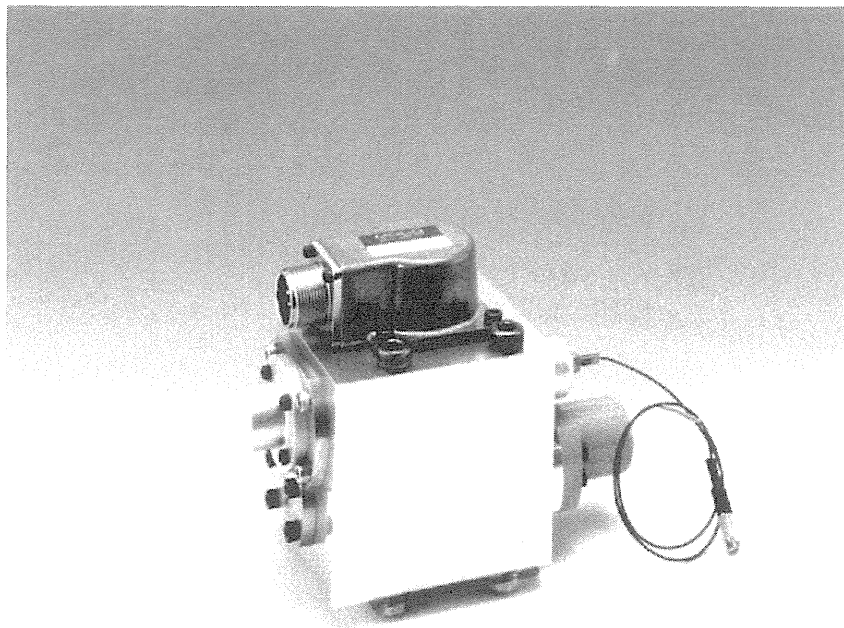


図 5-28 タンデム形超磁歪アクチュエータ駆動サーボ弁外観

第 6 章

ディーゼルエンジンコモンレール用
燃料噴射弁への適用とその性能

第 6 章で用いる記号

A_d	噴射孔面積 ($A_d = 6 \times \phi 0.16$)
A_p	パイロット弁開口面積
A_c	主弁受圧面積 (P_c 側) ($A_c = \frac{\pi}{4} D_c^2$)
A_s	主弁受圧面積 (P_s 側) ($A_s = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_s^2)$)
A_{ru}	主弁受圧面積 (P_u 側) ($A_{ru} = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_d^2)$)
A_{ud}	主弁受圧面積 (P_d 側) ($A_{rd} = \frac{\pi}{4} D_d^2$)
b_x	弁体摺動部の粘性抵抗係数
C_{dc}	流量係数 (スリット)
C_{dp}	流量係数 (パイロット弁)
C_{dd}	流量係数 (噴孔)
C_{ds}	流量係数 (主弁)
D_c	ニードルのコントロール室側直径
D_d	サック直径
K	作動流体の体積弾性係数
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_s	供給圧力
P_u	上流絞りー主弁シート間圧力
P_d	噴射圧力
Q_c	フィードバック流路通過流量
Q_p	パイロット弁制御流量
Q_r	主弁流量
Q_d	噴射流量
V_c	コントロール室容積
W_c	フィードバックスロット幅
W_m	弁座の周長
x	主弁リフト量
x_l	フィードバック流路のアンダーラップ長さ
ρ	作動流体 (軽油) の密度
E	ソレノイド励磁電圧

H	磁界の強さ
I	ソレノイド励磁電流
S	GMA変位
T	時間
u	GMA 駆動電気回路入力パルス信号（噴射指令パルス）

6・1 はじめに

ディーゼルエンジンは高い熱効率を示すことから、CO₂などによる地球温暖化問題に対しては好ましい特性を有していると言われているが、ディーゼル機関排出ガスの窒素酸化物（NO_x）、排気黒煙およびパティキュレート（PM）の、大都市や道路沿道における環境への影響が大きな問題として取り上げられ、その低減が強く求められている。これに対して、わが国だけでなく米国や欧州においても 21 世紀にかけて厳しい排出ガス規制が計画されている。

噴射の自由度が高いコモンレール式の高圧燃料噴射システムは、エンジン回転数に依存せずに低速から高圧噴射が可能であること、噴射圧力と噴射時期が独立に制御できること、分割噴射（パイロット噴射）も容易であることなどが低排ガス化に適すると考えられている。

従来、コモンレールシステムでは、小形オンオフ電磁弁をパイロット弁とする 2 段形燃料噴射弁が用いられている^{(6-1),(6-2),(6-3)}。この種の噴射弁ではパイロット弁のオンオフ的開閉に対応して噴射率形状が矩形となるが、初期噴射量の急峻な立ち上がりは NO_x 増大の原因となるため、実用的にはニードル弁とパイロット弁の間の油圧回路にオリフィスを設けて噴射開始時のニードル弁応答の立ち上がりを緩慢にし、初期噴射量を低減するなどの対策が施されている。しかしながら、固定絞りのオリフィスでは、多様なエンジン回転数や負荷状態の変化にあわせて噴射率形状の最適化を図ることは困難である。この問題に対し、流体式位置フィードバック機能の適用により、ニードル弁のリフト量制御が可能なパイロット弁比例制御形燃料噴射弁を開発し、パイロット弁に高速オンオフ弁を用いた場合の制御特性が報告されている⁽⁶⁻⁴⁾。この燃料噴射弁の機能を十分に引き出すためには、目標となる最適な噴射率形状に対して、パイロット弁開度を高速高精度で制御できる小形リニアアクチュエータが必要となるが、比例ソレノイドなどの従来形リニアアクチュエータでは、応答性、発生力、小形さの面で十分な性能を持つものがない。圧電素子駆動による高速応答燃料噴射弁が試作された例^{(6-5),(6-6)}もあるが、軽油環境下でその駆動に 600～1kV の高電圧を必要とするなどの実用上の課題がある。

そこで本章では、圧電素子と異なり、素子への電極結線がないので電気部と機械的駆動部を分離でき、また、ソレノイドにより低電圧で磁界を与えられるので、軽油環境下での使用に適していると考えられるタンデム形超磁歪リニアアクチュエータ（Giant Magnetostrictive Actuator：以下 GMA）をパイロット弁の駆動に適用し、コモンレール圧力 160MPa において噴射開始から終了までの一連の噴射率形状を制御できる燃料噴射弁を開発したので、その構造および噴射率制御特性を報告する⁽⁶⁻⁷⁾。

6・2 燃料噴射弁の構造と作動原理

燃料噴射弁（インジェクターとも呼ばれる）の構造図を図 6-1 に、作動模式図および諸元を図 6-2、表 6-1 に示す。燃料噴射弁は主弁となる段付きのニードル弁と、それを制御するパイロット弁からなる。パイロット弁はタンデム形 GMA により駆動され、ニードル弁のリフト量は流体式位置フィードバック機構によりパイロット弁の開度に比例して制御されるので、GMA のストロークに比例したニードル弁のリフト量制御が可能である。流体式位置フィードバック機構はニードル弁上部側面に設けられた矩形の溝流路（フィードバック流路、幅 W_c ）とコントロール室（容積 V_c ）により構成される。フィードバック流路はニードル弁が閉じた状態（ニードル弁リフト量 $x=0$ ）においてアンダーラップ量 x_l でコントロール室に開口している。パイロット弁が閉じた状態ではコントロール室圧力 P_c とコモンレール圧力 P_s はフィードバック流路を介して等しく、受圧面積の差（ $A_c > A_s$ ）によりニードル弁はバルブシートに押さえつけられ、高圧力下でのシールが保たれる。一方、パイロット弁が開くと、ニードル弁に作用する油圧力が平衡する位置（フィードバック流路開口面積とパイロット弁開口面積が等しくなる位置）にニードル弁が位置決めされる。フィードバック流路の開口面積はニードル弁リフト量に対して一次関数的に変化するので、その結果、ニードル弁リフト量はパイロット弁開度に比例して制御される^(6,7)。

タンデム形超磁歪アクチュエータのパイロット弁（図 6-3）リフト量は $50\mu\text{m}$ で、高速電磁弁のパイロット弁リフト量の 4 分の 1 であり、パイロット弁に高速電磁弁を用いたインジェクタのニードル弁ではリフト量が不足して噴射が行えない。そこで、超磁歪アクチュエータをパイロット弁として用いるにあたりニードル弁のフィードバックスロットの再設計を行った。

設計に当たり、電子比例インジェクタの理論特性を表す基礎式を示す。

1) パイロット弁流量 Q_p

$$Q_p = C_{dp} A_p \sqrt{\frac{2(P_c - P_r)}{\rho}} \quad (6-1)$$

2) フィードバック流路流量 Q_c

$$Q_c = C_{dc} W_c (x + x_l) \sqrt{\frac{2(P_s - P_c)}{\rho}} \quad (6-2)$$

3) 主弁流量 Q_r

$$Q_r = C_{ds} W_m x \sqrt{\frac{2(P_s - P_d)}{\rho}} \quad (6-3)$$

ただし、 $W_m = \pi D_s$

4) 噴射流量 Q_d

$$Q_d = C_{dd} A_d \sqrt{\frac{2(P_d - P_r)}{\rho}} \quad (6-4)$$

5) コントロール室に関する連続の式

$$Q_c + A_c \dot{x} - Q_p = \frac{V_c}{\beta_e} \dot{P}_c \quad (6-5)$$

6) サックにおける連続の式

$$Q_r - A_r \dot{x} - Q_d = \frac{V_d}{K} \dot{P}_d \quad (6-6)$$

7) 主弁運動方程式

$$m_s \ddot{x} + b_x \dot{x} + k_f x = P_s A_s + P_u A_{ru} + P_d A_{ru} - P_c A_c \quad (6-7)$$

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。

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

k_f を定常流体力係数として

$$k_f = 2C_{dr} W_m (P_s - P_r) \quad (6-9)$$

8) 主弁の受圧面積関係

$$A_s + A_{ru} + A_{rd} = A_c \quad (6-10)$$

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。

次に、理論静特性を導く。パイロット弁が開くとコントロール室圧力 P_c が低下し、圧力による軸力が開弁方向作用してニードル弁は開き始めるが、フィードバック流路の開口面積はニードル弁リフトに比例して変化するので⁽⁶⁻⁵⁾、ニードル弁は軸力が平衡する位置（フィードバック流路通過流量 Q_c とパイロット弁制御流量 Q_p が等しくなる位置）に位置決めさ

れる。よって、定常状態では(6-11)式が成り立つ。

$$Q_c = Q_p \quad (6-11)$$

開弁前は $P_d = 0$ 、開弁後もニードル弁リフトの小さい領域では、主な軸力の要素である $A_s P_s$ 、 $A_c P_c$ に対し、 $A_{rd} P_d$ は小さいとすれば、定常状態では軸力が平衡しているので、

$$A_c P_c = A_s P_s + A_{ru} P_u \quad (6-12)$$

(6-11) 式、(6-12) 式より、パイロット弁とフィードバック流路の流量係数 C_d は等しいとして(6-13)式が得られる。

$$x = \frac{A_p}{W_c} \sqrt{\frac{\kappa}{1-\kappa}} - x_l \quad (6-13)$$

ここで、 κ はニードル弁の面積比 $\kappa = (A_s + A_{ru})/A_c$ である。(6-13) 式より、ニードル弁リフト量 x は圧力に無関係で、ニードル弁各部受圧面積とフィードバック流路の諸元により決まり、パイロット弁開度 A_p の一次関数として制御されることがわかる。

ニードル弁が開くためには、パイロット弁開口面積、フィードバック流路寸法等諸元は(6-13) 式より次式を満たす必要がある。

$$x = \frac{A_p}{W_c} \sqrt{\frac{\kappa}{1-\kappa}} - x_l > 0 \quad (6-14)$$

また、定常状態においてニードル弁開度が十分であり $P_d = P_u$ であると仮定すると、(6-1) 式と(6-2) 式よりパイロット弁とフィードバック流路の流量関係式

$$A_p \sqrt{P_s} = W_c (x + x_l) \sqrt{P_s - P_c} \quad (6-15)$$

が得られ、これよりニードル弁の最大リフト量は、次式で表わされる。

$$x = \frac{A_p}{W_c} \sqrt{\frac{A_c}{A_c - (A_s + \alpha(A_{ru} + A_{rd}))}} - x_l \quad (6-16)$$

ここで α は絞りによる減圧係数で、下式で定義され、今回は 0.8 とした。

$$\alpha = P_u / P_s$$

以上の理論式を基本に、ニードル弁の開弁条件 (6-14) 式、最大リフト量の (6-16) 式を用いるとともに、ボンドグラフによるニードル弁の動特性、噴射特性の数値シミュレーションを行った結果、フィードバック流路の諸元を次のように決定した。表 6-2 数値シミュレーションに用いた数値を示す。図 6-4 から図 6-7 にシミュレーション結果を示す。

$$W_c = 0.2 \times 10^{-3} \text{m} \quad (0.2\text{mm} \quad 1\text{place})$$

$$x_l = 0.2 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$(2-14)\text{式より} \quad x = 4.38 \times 10^{-4} \text{m} > 0$$

$$(2-16)\text{式より} \quad x = 0.46 \times 10^{-3} \text{m}$$

6・3 燃料噴射弁の性能試験

6・3・1 タンデム形超磁歪アクチュエータの静特性と過渡応答特性

図 6-8 にタンデム形 GMA の静特性を、表 6-3 に諸元を示す。コイルで発生する磁界の強さ 100kA/m に対し、約 50 μm の最大アクチュエータ変位が得られる。図 6-9 にパルス幅 4ms の入力信号に対するタンデム形 GMA の過渡応答を示す。応答時間は伸長時で 0.3ms, 縮長時で 0.5ms で高速応答であることがわかる。なお、過渡応答では 3.6kHz の減衰振動が見られるが、これはプリストレス用皿ばねと超磁歪ロッドを直列ばねとし、可動質量をプランジャ及び出力軸の質量とした時の固有振動数 3.1kHz にほぼ一致する。

6・3・2 噴射率の測定法と装置

噴射率の計測方法は、いままで種々の方法が考案されており、それらの方法とその特徴を表 6-4 に示す⁽⁶⁻³⁾。なお、本研究においては長管法 (Bosch 方式) を用いた。

長管法 (Bosch 方式)

(1) 計測の原理

ノズルから噴射された燃料を細いパイプの中に流すと、噴射率 \dot{Q}_D は、次の式で表わされる。

$$\dot{Q}_D = F \cdot v_p \quad (6-17)$$

F : パイプ内断面積

V_p : パイプ内の流速

また、非定常流中の単一圧力 $p(t)$ は、次式で表わされる。

$$p(t) = a \cdot \rho \cdot v \quad (6-18)$$

a : 流体の音速

ρ : 流体の密度

式(6-17)と(6-18)より噴射率 \dot{Q}_D は、次式で求められる。すなわち噴射率 \dot{Q}_D は、圧力 $p(t)$ に比例するので、パイプ内圧力の時間変化を計測することにより求められる。

$$\dot{Q}_D = \frac{dQ_D}{dt} = F \cdot \frac{p(t)}{a \cdot \rho} \quad (6-19)$$

噴射率は、パイプ内の断面積が変化するとその部分から反射波が重合して、正しい計測ができない。したがってパイプは全長にわたり、常に一定断面積に保つ必要がある。

(2) 計測装置

計測装置の模式図を図に示す。装置は次の4つの部分から構成される。

- ① パイプ内の圧力を計測する圧力変換器
- ② 一定断面積で十分な長さのパイプ
- ③ パイプ内の圧力波を減衰させる絞り弁
- ④ パイプ内に背圧を与える背圧弁

正確な圧力波形を得るために、パイプ長さは次の二つの条件を満足させる必要がある。

- ① 噴射燃料の圧力が、パイプ端からの反射波で影響されないこと。すなわち、噴射期間（時間）よりもパイプ端からの反射波がノズル部へ到達する時間が長くなるパイプの長さであること。
- ② 次の噴射までにパイプ内の圧力波を完全に減衰できるパイプの長さであること。
実験の結果より反射波は約4回の反射で減衰する。

これらを式で表わすと、次式となる。

$$\textcircled{1} : L_p > \frac{a \cdot t_E}{2} \quad (6-20)$$

$$\textcircled{2} : L_p < \frac{60a}{2 \times 4N_p} \quad (6-21)$$

t_E : 噴射期間, s

N : 噴射ポンプ回転速度, rpm

実験装置の概要を図6-10に示す。空気圧式インテンシファイア（Max.250MPa）により高圧力に保たれたインジェクタに、ドライバーを通して関数発生器からソレノイドに通電されることにより、パイロット弁が作動し噴射を行い、噴射率を長管法（Bosch方式）により背圧を5MPaとして計測する。噴射指令は関数発生器で作成した矩形波とし、パイロット弁駆動用ドライバーは、パイロット弁の電磁気的および機械的な作動遅れを低減するため、矩形噴射指令に対して図6-11に示すように最初の1.4msは大電流、以降は定格電流とした2段階の電流波形でコイルを励磁する、過励磁回路を使用した。

6・3・3 燃料噴射弁の過渡応答特性（噴射率特性）

パイロット弁として超磁歪アクチュエータを用いた電子比例形の燃料噴射弁の噴射特性を確認するために、長管法により噴射率を測定した。図 6-12 から図 6-15 にコモンレール圧力 $P_s=20\text{MPa}$ 、 50MPa 、 100MPa 、 160MPa における噴射時間幅 4ms に対する噴射率測定結果を、図 6-16 に各コモンレール圧力における噴射遅れをまとめたものを示す。これより、コモンレール圧力 160MPa において噴射指令パルスに対する噴射開始遅れは 0.4ms 、噴射停止遅れは 0.5ms であり、ディーゼルエンジンの高速回転 3000rpm におけるクランク角 30 度相当の噴射（噴射時間幅 1.67ms ）に十分な応答性を持つことが分かる。さらに、噴射指令パルスに対する噴射開始遅れが 2 ポート高速電磁パイロット弁とは異なり、コモンレール圧力によらず 0.4ms と優れた応答性を示すことがわかる。また、コモンレール圧力が高圧力になるにつれて超磁歪アクチュエータのストロークが小さくなっていることがわかる。これは、コモンレール圧力が高圧の場合にはパイロット弁先端および出力軸に結合しているプランジャに圧力がかかるため、超磁歪ロッドのプリロードが上がるためと思われる。図 6-17 に各コモンレール圧力における最大噴射率をまとめたものを示す。

また、ソレノイドの励磁電流を今までの設定値（ 11A ）より低く設定し、超磁歪アクチュエータのストロークを小さくすることにより、コモンレール圧力 160MPa における最大噴射率を変化させることを試みた。図 6-18 にコモンレール圧力 160MPa における各励磁電流での噴射時間幅 4ms に対する噴射率測定結果とその時の超磁歪アクチュエータのストロークを示す。また、図 6-19 に各励磁電流における最大噴射率をまとめたものを示す。これより、超磁歪アクチュエータのストロークを変化させることにより最大噴射率を制御することが可能であることがわかる。この場合、最大噴射率が制御できる超磁歪アクチュエータのストロークの幅が $5\mu\text{m}$ 程度と狭いので、高度な微笑位置決め制御が必要と思われる。

6・3・4 噴射率の可変制御

噴射指令パルスによる単一噴射では、GMA パイロット弁の開度は弁閉と最大開度の 2 位置をとり、よって噴射率形状も図 6-12 のように矩形となる。しかし、急峻な噴射率の立ち上りは NO_x 増大の原因となるため、ランプ波形状に緩やかに噴射率を増加し、噴射停止については黒煙低減の観点から速やかに噴射を終えることが望ましい。このような噴射率波形をエンジン負荷と回転数に応じて適切に可変に制御するため、GMA ソレノイドの励磁電流制御より、電氣的に任意の噴射率立ち上がり特性を設定することを試みた（図 6-20）。GMA ソレノイドのインダクタンス L は 1.16mH 、電気抵抗 R は 1.5Ω であり、これにより電流変化の時定数 τ ($\tau=L/R$) は 0.77ms となる。したがって、 τ より十分短い周期でソレノ

イド励磁電圧をパルス幅変調すればソレノイドの励磁電流制御が行える。図 6-21 に目標噴射率波形を形成するための電流、電圧波形、GMA 変位の概念図を示す。目標噴射率形状を形成するための入力信号は、噴射開始遅れを低減する補償パルス、噴射開始後の立ち上がり特性を制御するパルス幅変調領域、および定常状態領域で構成される。GMA 駆動回路において、補償パルス及びパルス幅変調領域では一パルスの幅が電磁氣的遅れを補償するためのワンショット電圧パルス幅 0.2ms より短いので、電磁氣的遅れ補償用の高電圧パルスによりソレノイド励磁電流が制御される。パルス幅変調領域が終了して定常状態に移行すると、噴射指令一パルスに対する励磁シーケンスにしたがってパルス幅 0.2ms のワンショット高電圧パルスが印加された後、定常状態用の低電圧に切り替わる。

図 6-22、図 6-23 は、コモンレール圧力 160MPa において搬送波周波数 8kHz（サンプリング周期 0.125ms）でパルス幅変調された噴射指令パルスにより、噴射率立ち上り時の過渡特性が異なる傾きを持つように設定した場合の噴射率測定結果である。噴射開始から緩やかな傾きを持たせている図 6-23 においては、噴射初めに脈動が見られるが、これはニードル弁がわずかに開いたリフト量微小の位置では流体式位置フィードバック機構のゲインが高く、不安定になりやすいためである。いずれの噴射率測定結果においても、噴射率 10mm³/ms 以上では噴射率立ち上り特性の傾きに変化を与えられていることがわかる。

以上から、パイロット弁駆動にタンデム形超磁歪アクチュエータを用いることで、コモンレール用電子燃料噴射弁(図 6-24、図 6-25)を開発し、コモンレール圧力 160MPa において開弁時 0.3ms、閉弁時 0.5ms の噴射応答性が得られた。さらに、パルス幅変調した噴射指令信号で GMA を駆動することにより、パイロット弁にオンオフ弁を用いた従来のコモンレール用電子燃料噴射弁では困難であった、噴射率形状の連続可変制御が可能であることを示した。

このように従来不可能であった噴射率形状の連続可変制御が可能となり、小型、高応答、高発生力であるタンデム形超磁歪アクチュエータの有用性が実証できた。

第 6 章参考文献

- (6-1) Osuka. I., 他 3 名, *SAE paper* 940586, (1994).
- (6-2) 宇野, 他 4 名, いすゞ技報, No.99, (1998), 29-35.
- (6-3) 加藤, 他 3 名, 三菱自動車テクニカルレビュー, No.11, (1999), 16-24.
- (6-4) 佐藤, 田中, 伏屋, 機論, No.99-1460, 採択決定, 巻号未定.
- (6-5) M. Rumphorst,, MTZ, Vol.56, No.3, (1995), 142-148.
- (6-6) E. Hayes, U.S Patent, No.5779149, (1998).
- (6-7) 佐藤, 田中, 浦井, 山田, 機論, 66-647, C, (2000), 2286-2291.

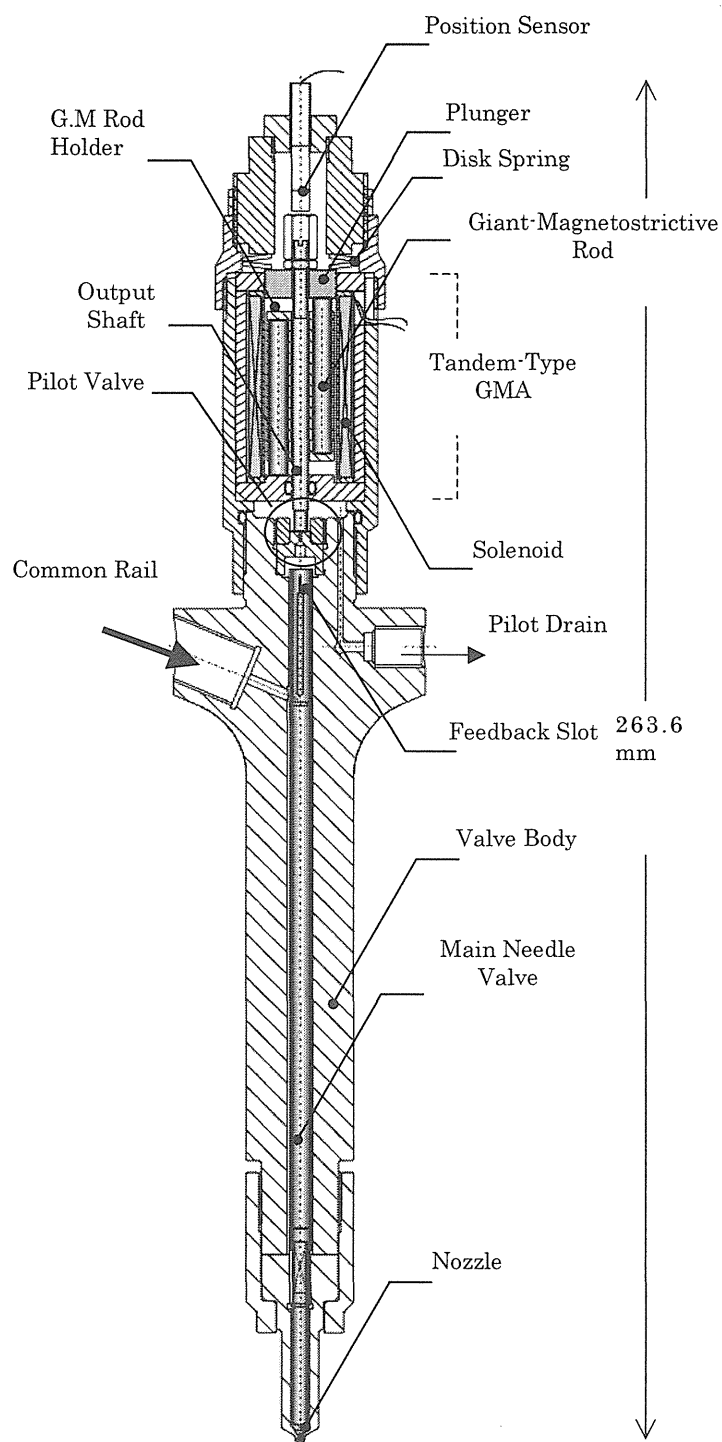


図 6-1 タンデム形超磁歪アクチュエータ駆動燃料噴射弁

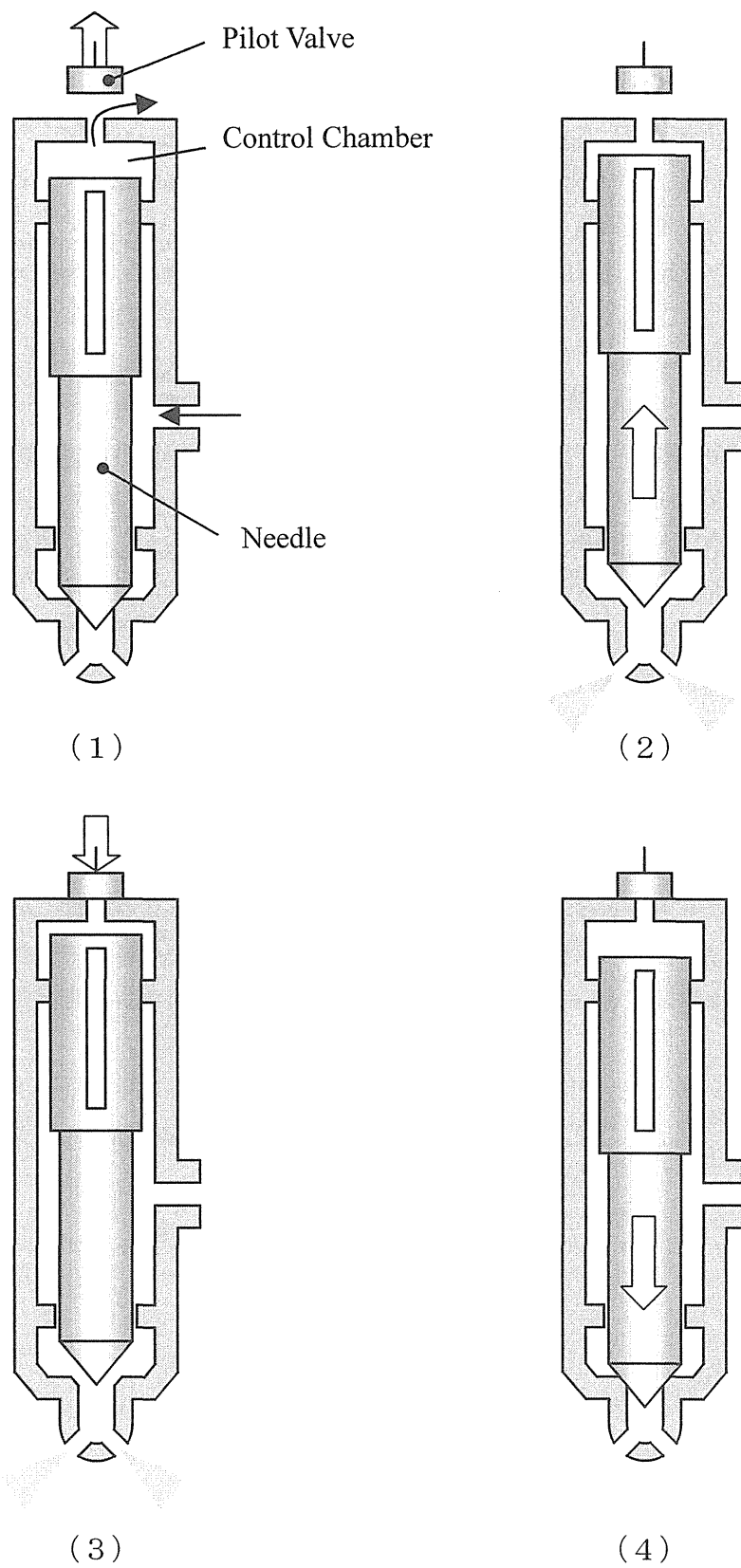


図 6-2 電子比例燃料噴射弁の動作原理

表6-1 燃料噴射弁仕様

Main Needle Valve	
Diameter of Needle (d_r)	$\phi 4.2\text{mm}$ (P_c -Side) $\phi 4.0\text{mm}$ (Needle Dia.) $\phi 2.2\text{mm}$ (Valve Seat)
Feedback Slot Width (W_c)	$0.2\text{mm} \times 1\text{slot}$ (W_c)
Feedback Slot Under Lap (x_l)	0.2mm
Injection hole (d_d)	$\phi 0.16\text{mm} \times 6\text{holes}$
Max. Needle Lift (x_{\max})	approx. 2.4mm
Pilot Valve (driven by Tandem-type GMA)	
Diameter of Valve Seat (d_p)	$\phi 0.5\text{mm}$
Giant Magnetstrictive Rod	$\phi 3.5\text{mm} \times 30\text{mm}$ $\times 3\text{Rods} \times 2\text{Set}$
Turn of GMA Solenoid	300 turn
Max. Pilot valve Lift ($x_{p\max}$)	approx. 0.2mm
Operated Common Rail Pressure	
(P_s)	$\sim 160\text{MPa}$

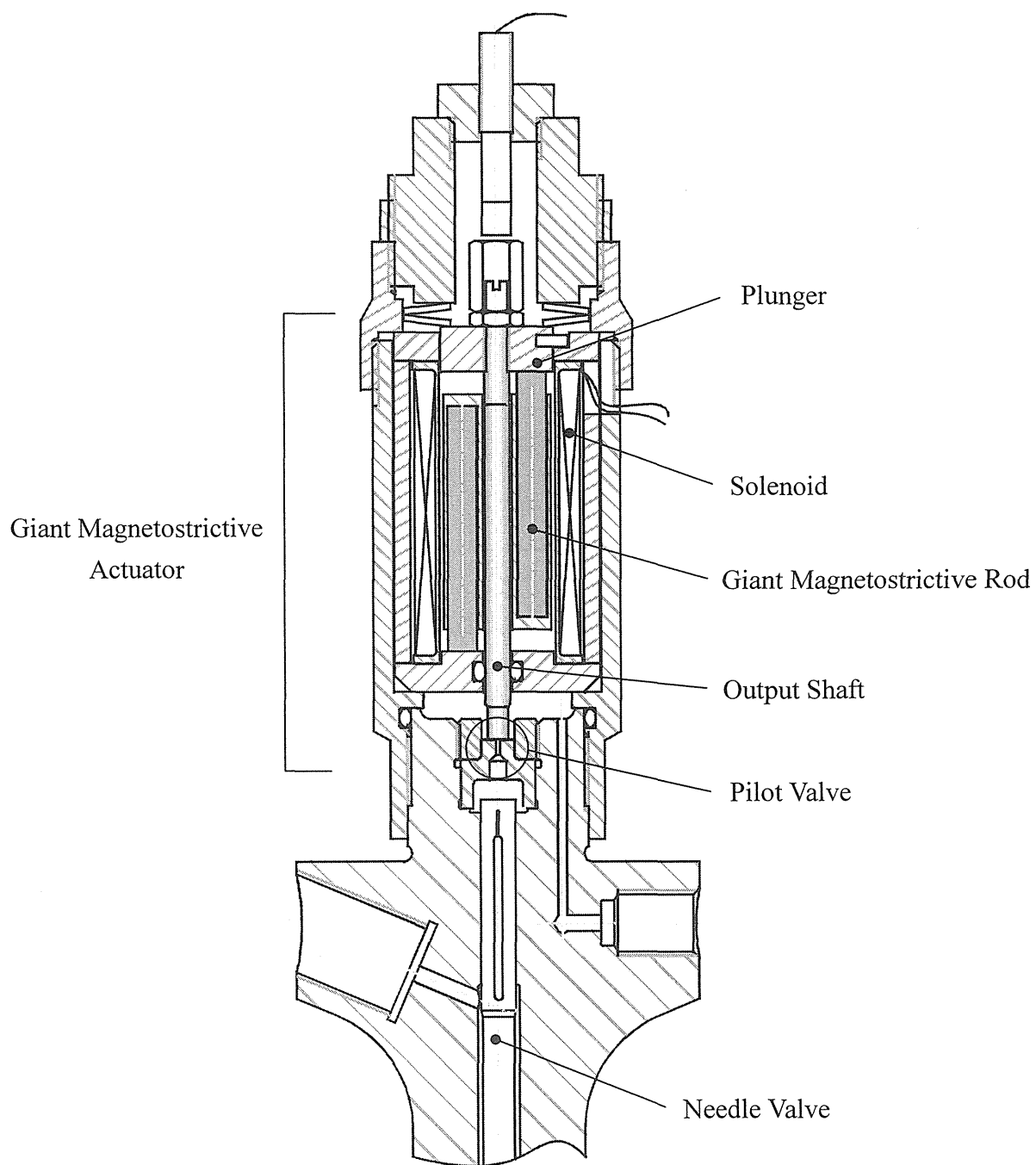


図 6-3 超磁歪アクチュエータの構造

表 6-2 シミュレーションに用いた記号と数値

主弁受圧面積 (P_c 側)	A_c	$1.39 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
噴射孔面積	A_d	$1.21 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
パイロット弁開口面積	A_p	$7.85 \times 10^{-8} \text{ m}^2$
主弁受圧面積 (P_s 側)	A_s	$1.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
主弁受圧面積 (P_u 側)	A_{ru}	$8.77 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
主弁受圧面積 (P_d 側)	A_{rd}	$9.50 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
弁体摺動部の粘性抵抗係数	b_x	20
流量係数 (スリット)	C_{dc}	0.7
流量係数 (パイロット弁)	C_{dp}	0.7
流量係数 (主弁)	C_{ds}	0.7
流量係数 (絞り)	C_{du}	0.7
ニードルのコントロール室側直径	D_c	4.2 mm
ニードルの供給圧受圧側直径	D_s	4.0 mm
サック直径	D_d	1.1 mm
作動流体の体積弾性係数	K	$1 \times 10^9 \text{ MPa}$
弁体質量	m	0.01 kg
供給圧力	P_s	160 MPa
コントロール室容積	V_c	$1.06 \times 10^{-7} \text{ m}^3$
サック容積	V_d	$5.13 \times 10^{-10} \text{ m}^3$
フィードバックスロット幅	W_c	0.2mm
弁座の周長	W_m	$3.46 \times 10^{-3} \text{ m}$
作動流体 (軽油) の密度	ρ	840 kg/m^3

表 6-3 超磁歪アクチュエータの諸元

Diameter of Valve Seat (d_p)	$\phi 0.5\text{mm}$
Giant Magnetstrictive Rod	$\phi 3.5\text{mm} \times 30\text{mm} \times 3\text{Rods} \times 2\text{Set}$
Turn of GMA Solenoid	300turn
Max Pilot Valve Lift ($x_{p\max}$)	approx. $50 \mu \text{ m}$

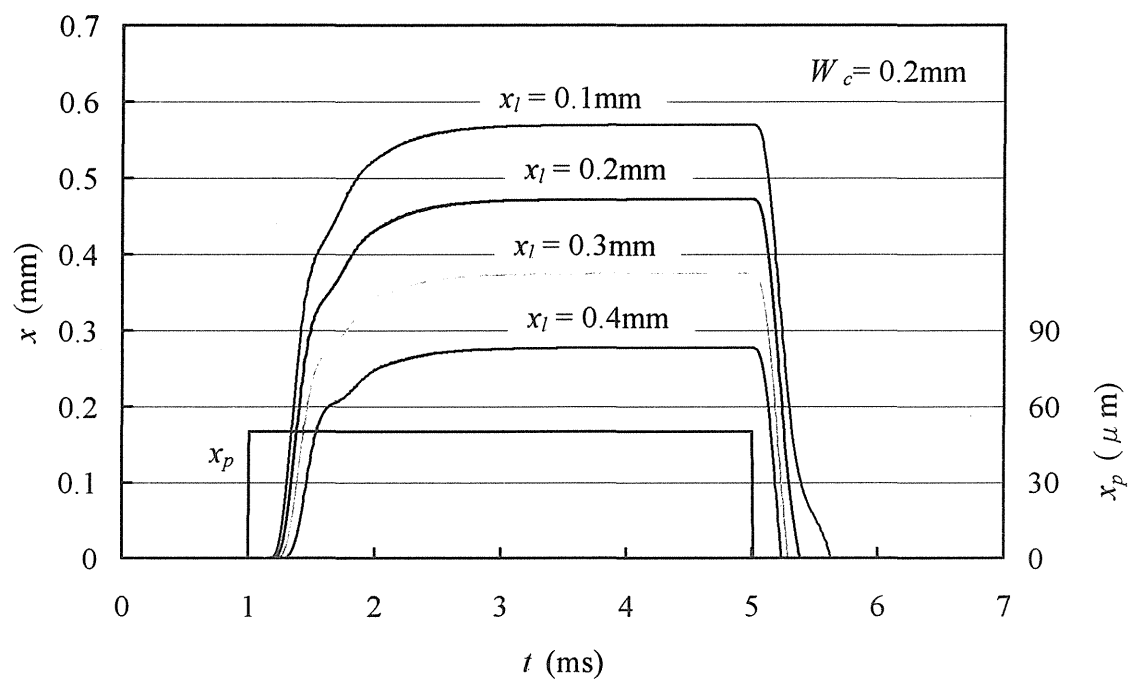


図 6-4 シミュレーション結果 (ニードル弁変位 : $P_s = 160\text{MPa}$)

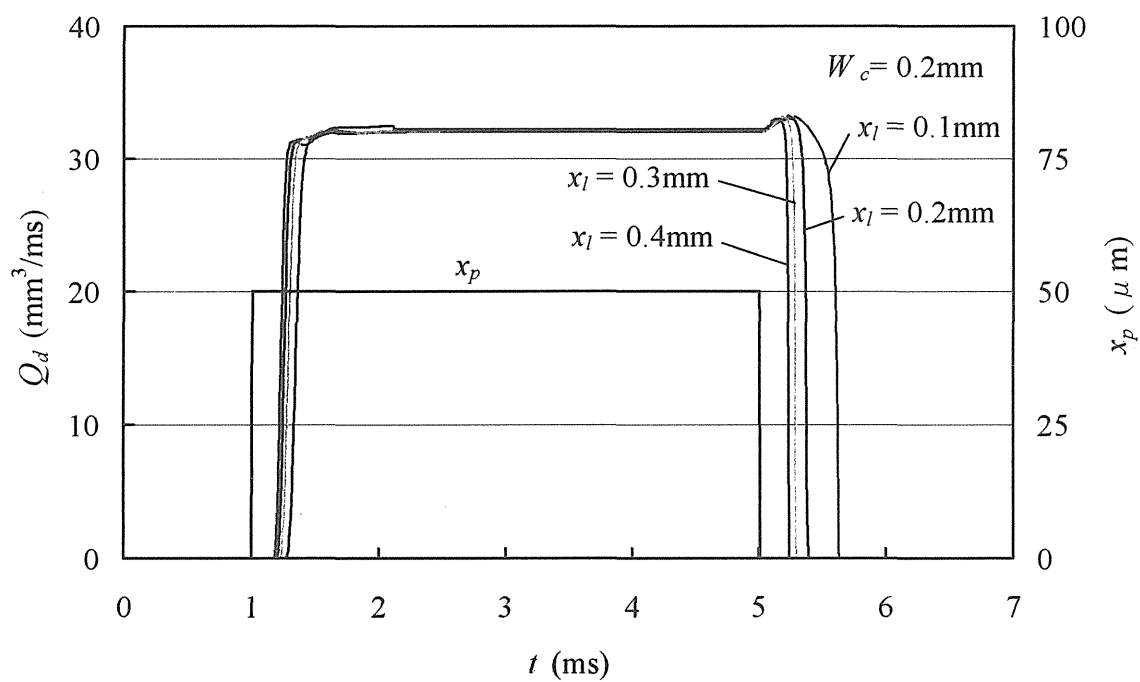


図 6-5 シミュレーション結果 (噴射率 : $P_s = 160\text{MPa}$)

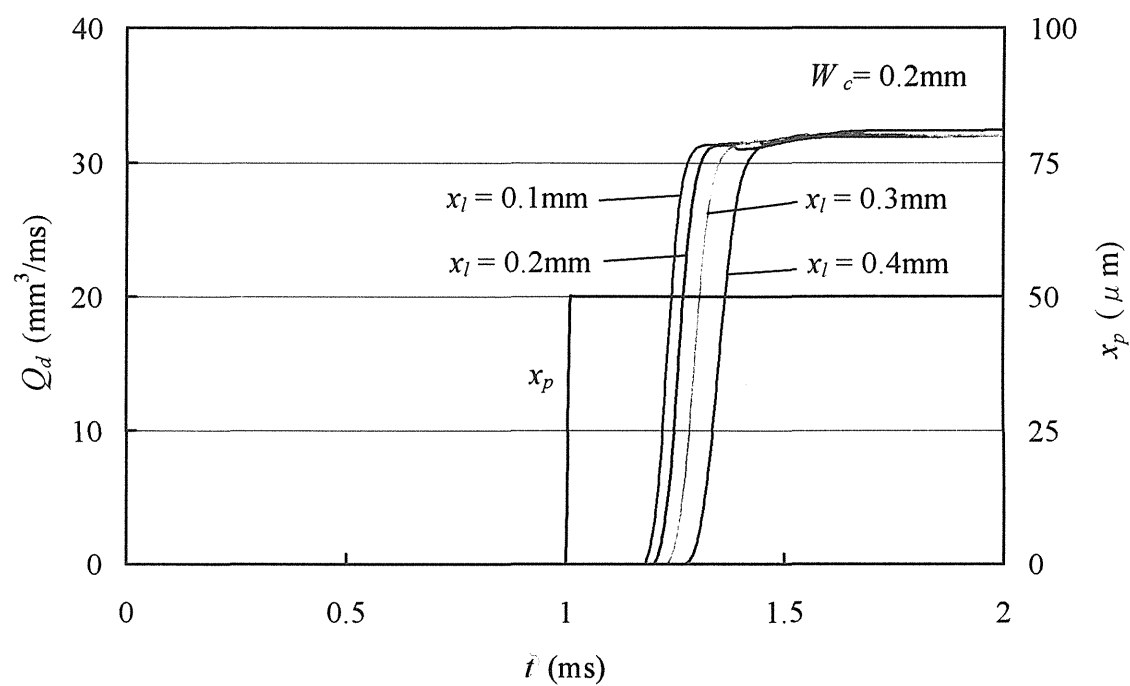


図 6-6 シミュレーション結果（噴射率（噴射開始）： $P_s = 160\text{MPa}$ ）

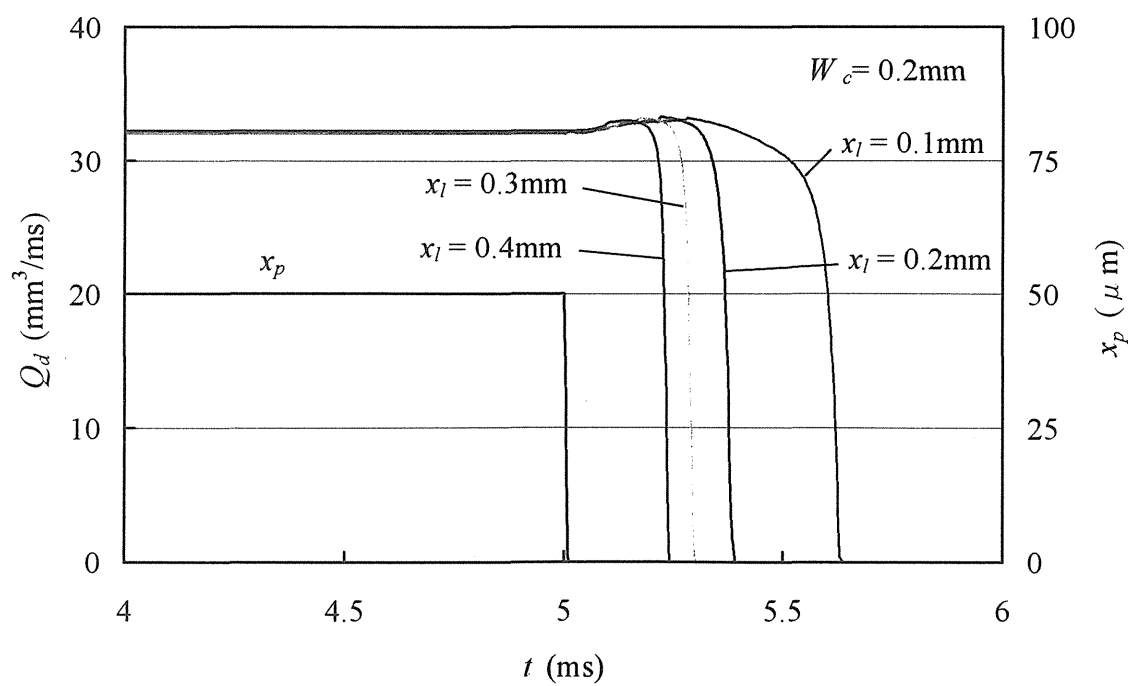


図 6-7 シミュレーション結果（噴射率（噴射終了）： $P_s = 160\text{MPa}$ ）

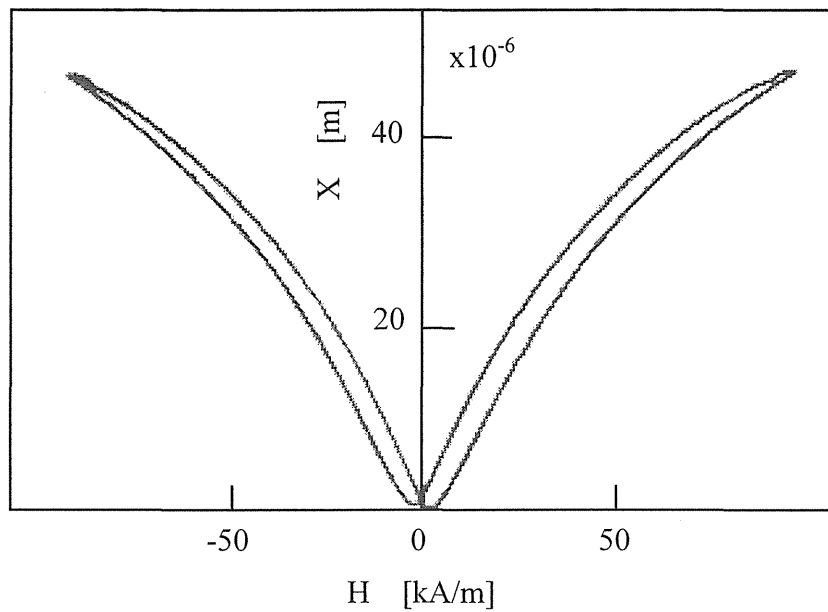


図 6-8 超磁歪アクチュエータの静特性

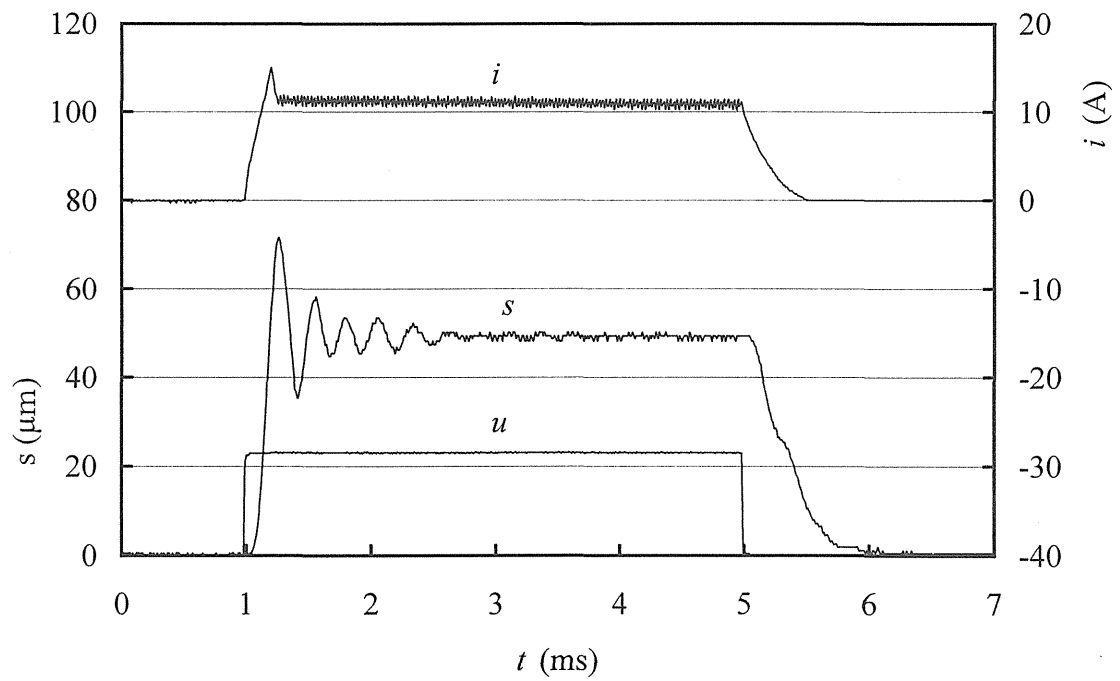
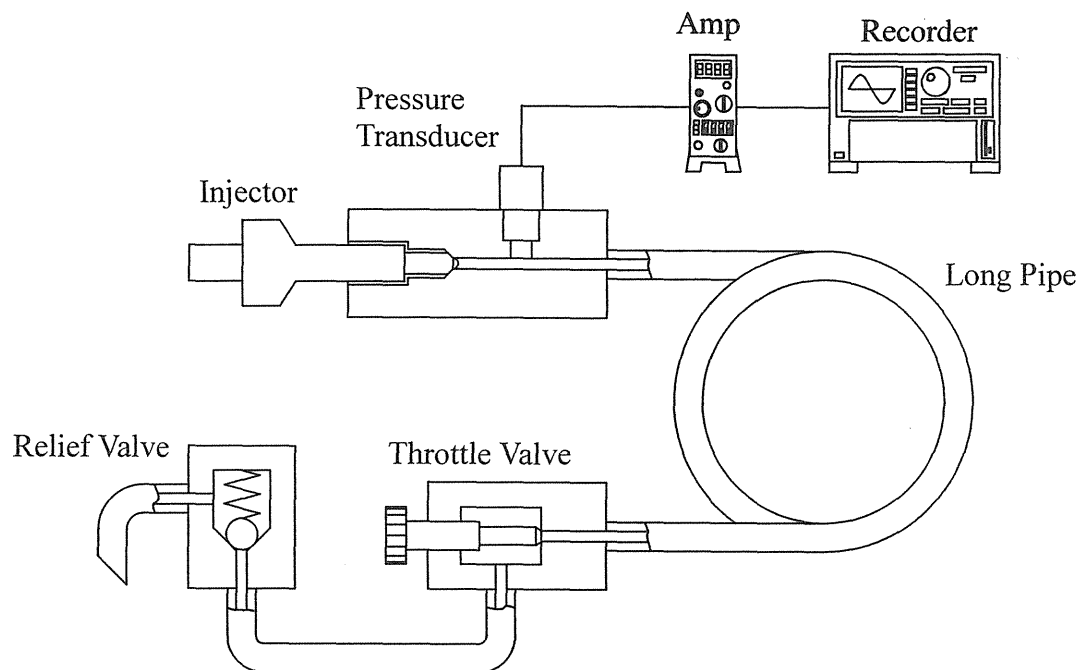


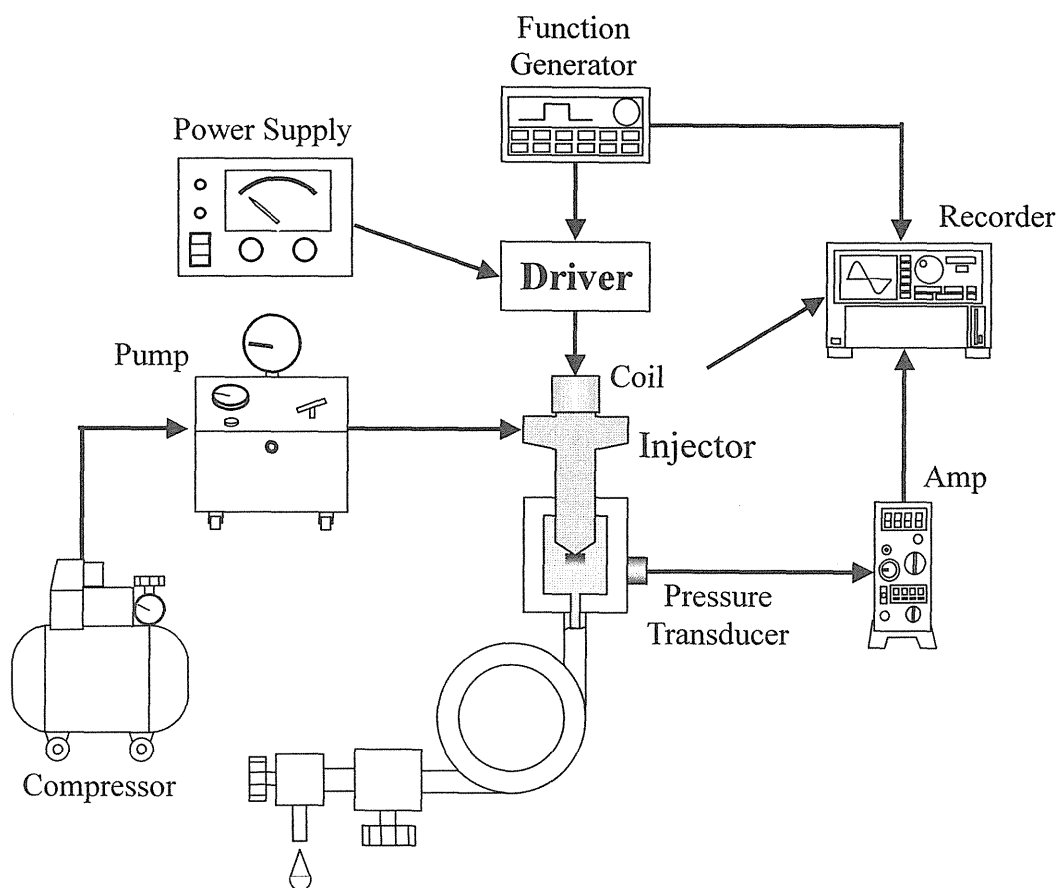
図 6-9 超磁歪アクチュエータの過渡特性

表 6-4 噴射率計測方法の特徴

計測方法	長所	短所
BOSCHの方法 (長管法)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 直読でき、背圧が加えられる ・ 微分演算が不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 波形のベースラインに低周波のうねりが発生する ・ 背圧、噴射量等の噴射条件が変わるたびに絞り弁の調整が必要
定容積法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 直読でき、背圧が加えられる ・ 操作が簡単である 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微分計算が必要 ・ 高周波のノイズが発生する
圧力リフト法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 着火運転中の測定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 噴口有効断面積の変化範囲が広く、計測の読み取り、換算過程での誤差が生じやすい ・ ノズル油だまり部の圧力測定が困難
モーメントム法	<ul style="list-style-type: none"> ・ モーメントム係数での補正は必要だが、計算過程での誤差はほとんどない ・ 実噴射と同じ気中噴射での測定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ モーメントム係数での補正が必要 ・ 少量の2次噴射が測定できない
レーザ流速法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 着火運転中の測定が可能 ・ 低圧ガソリンインジェクタの噴射率測定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管内圧力 5 MPa 以上では測定誤差が大きい ・ トレーサを入れる必要がある



(a) 噴射率計測装置



(b) 構成

図 6-10 実験装置の概要

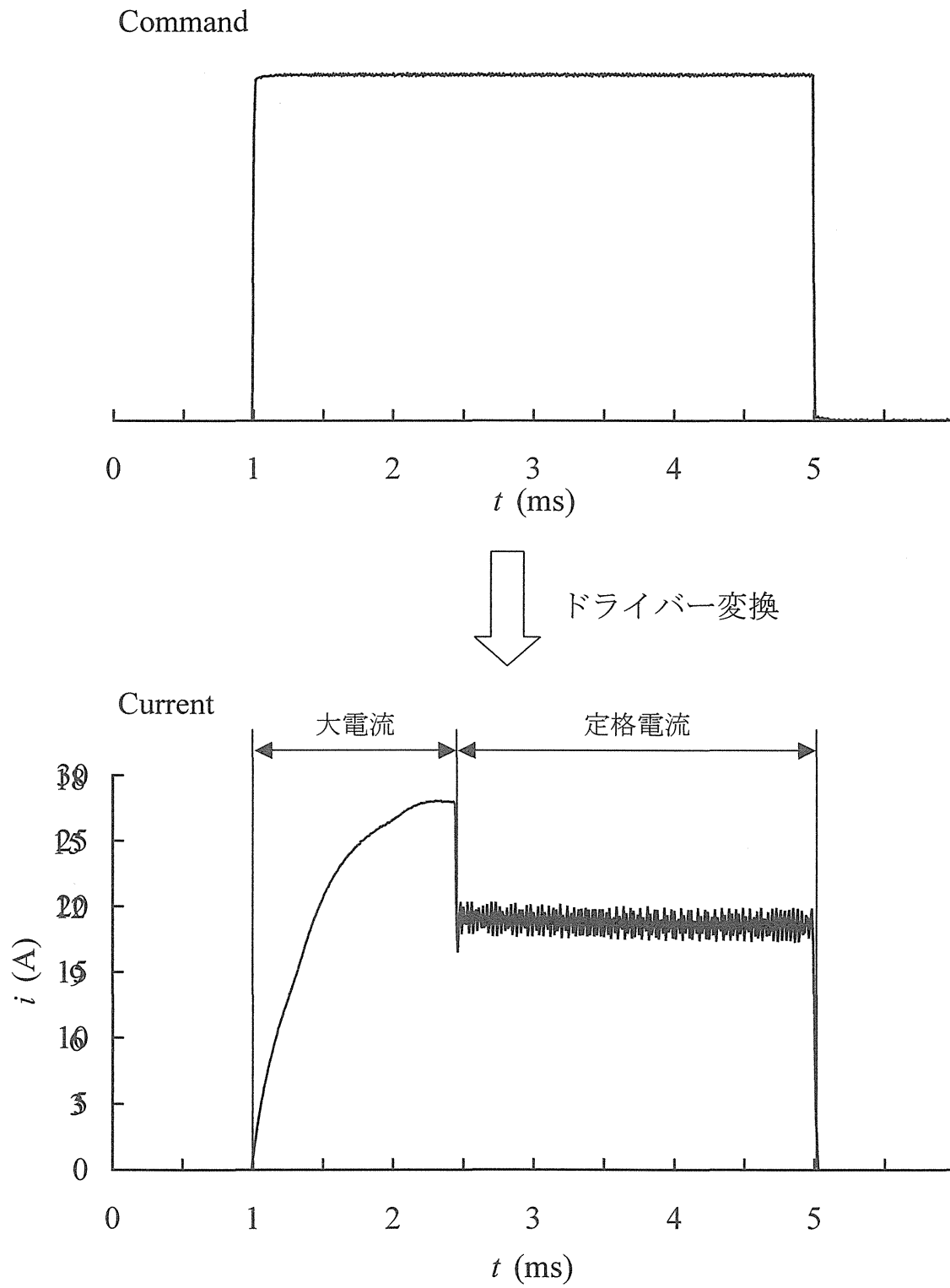


図 6-11 パイロット弁駆動用ドライバーの特性

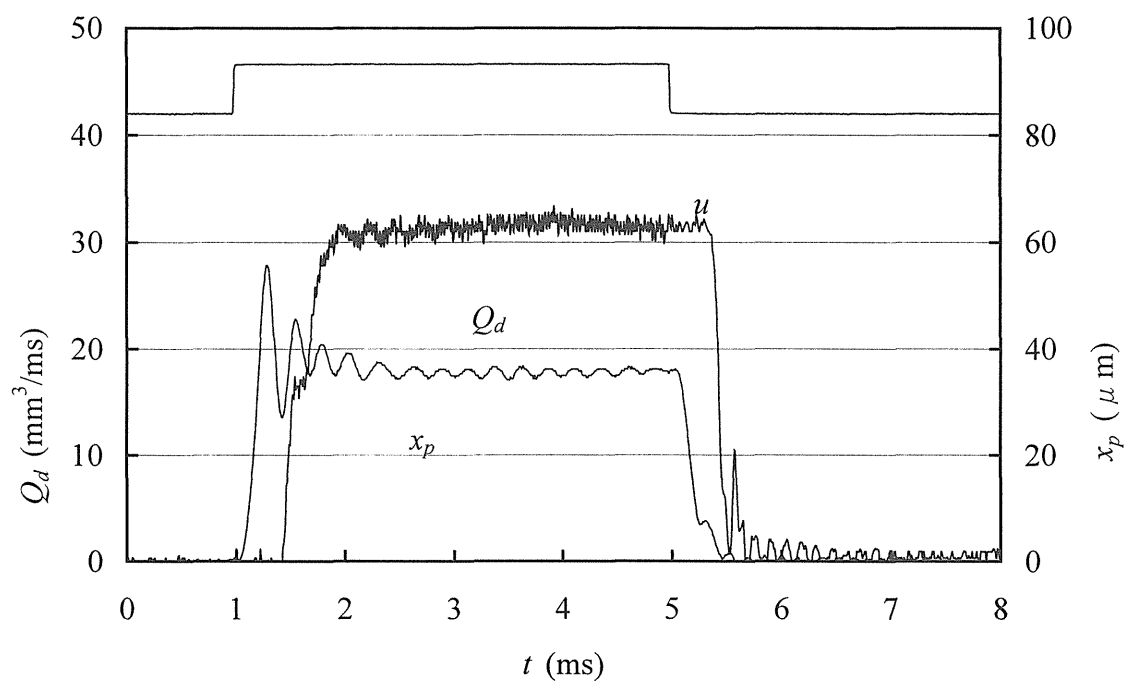


图 6-12 喷射特性(160MPa)

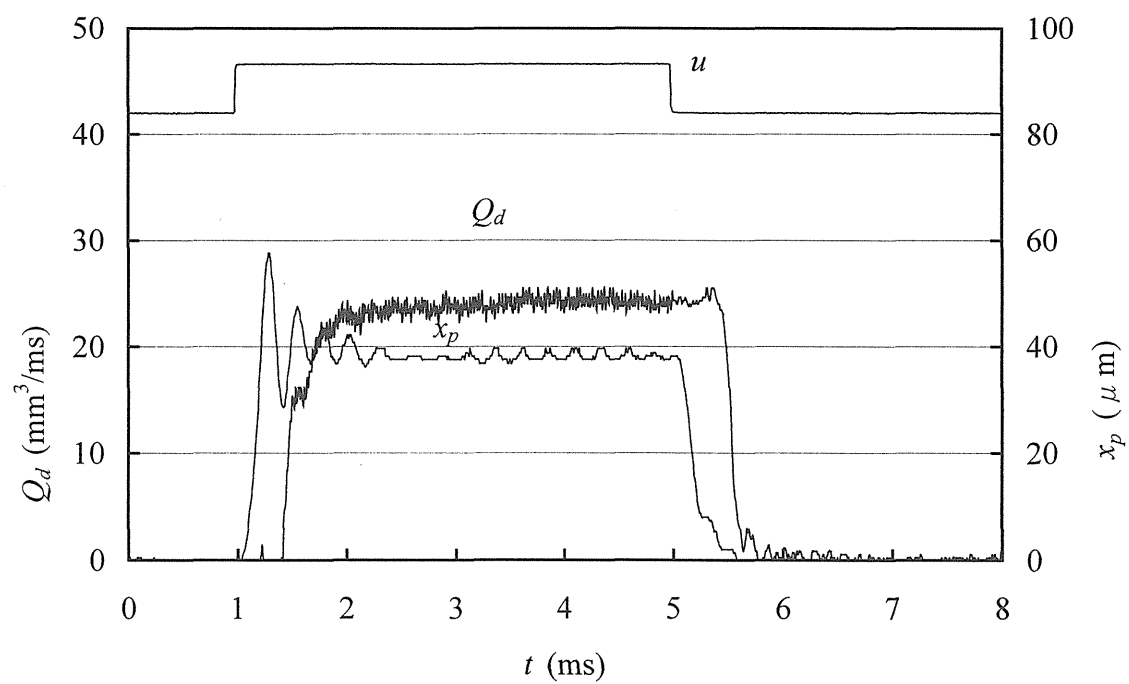


图 6-13 喷射特性(100MPa)

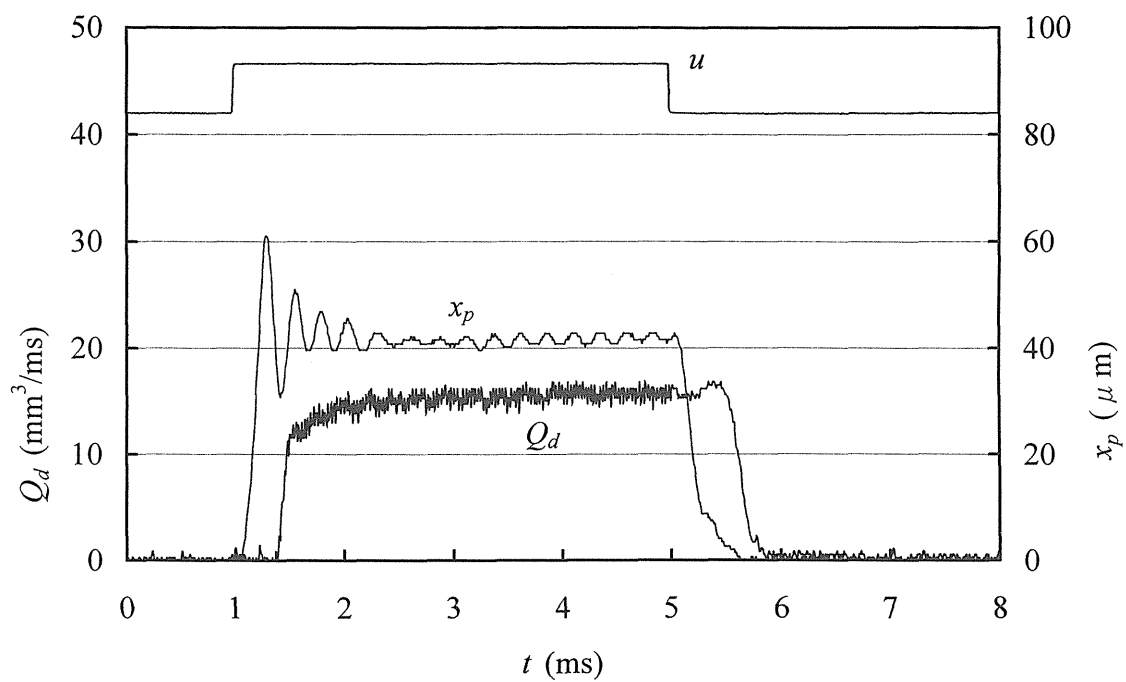


图 6-14 喷射特性(50MPa)

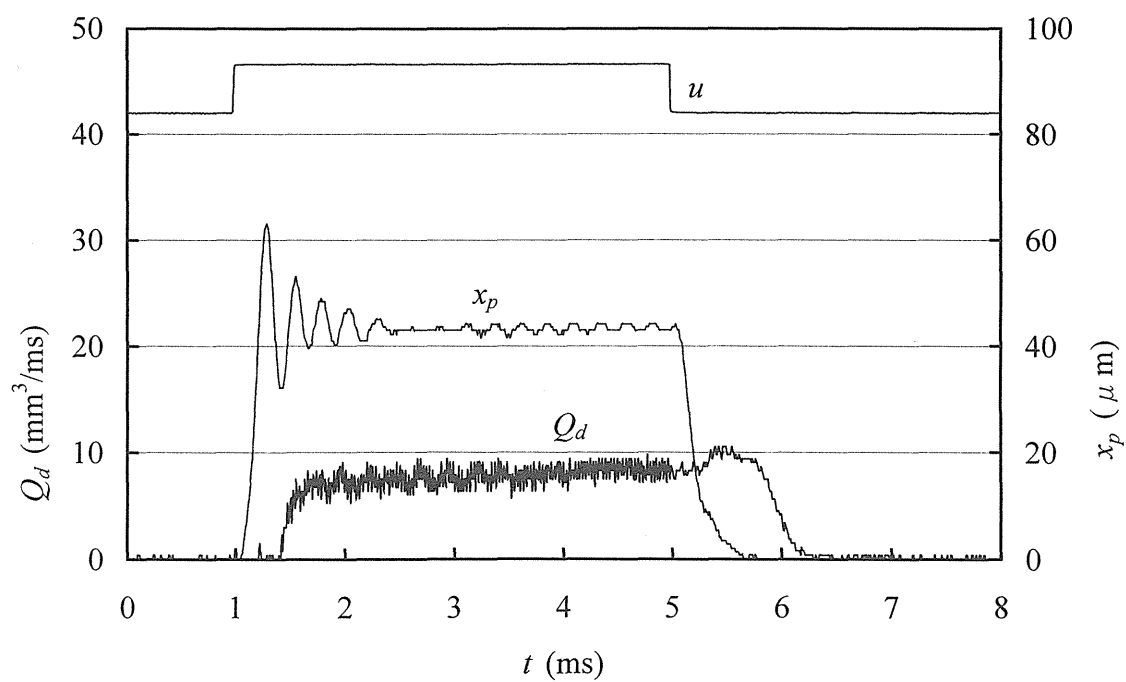


图 6-15 喷射特性(20MPa)

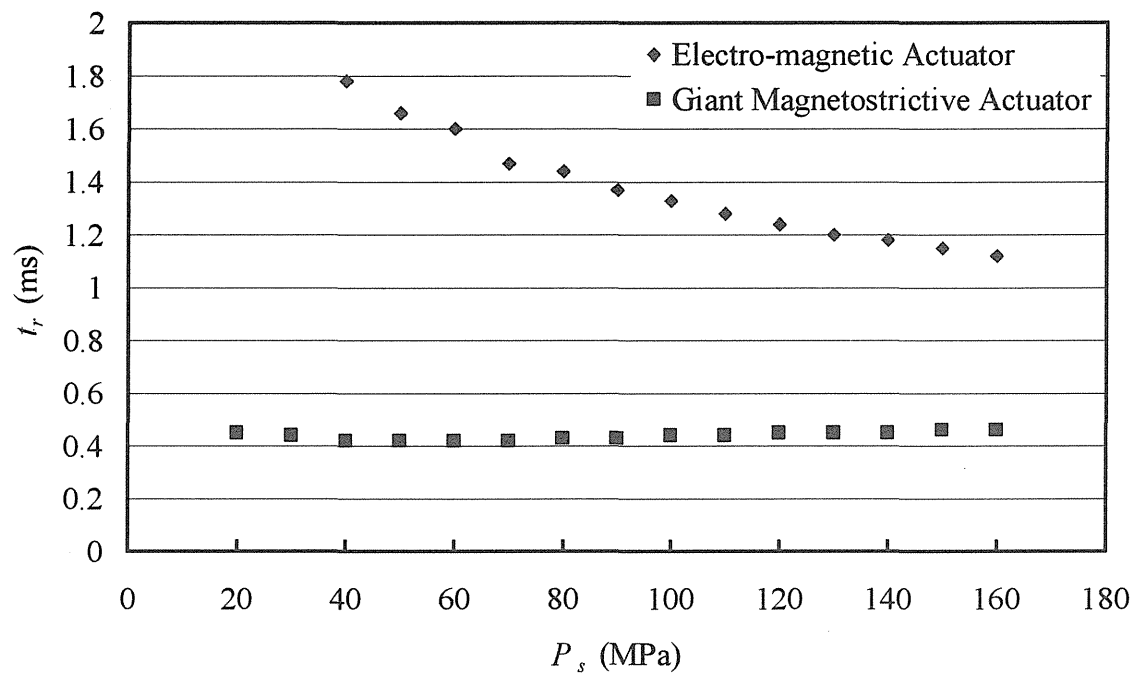


図 6-16 各コモンレール圧力における噴射遅れ

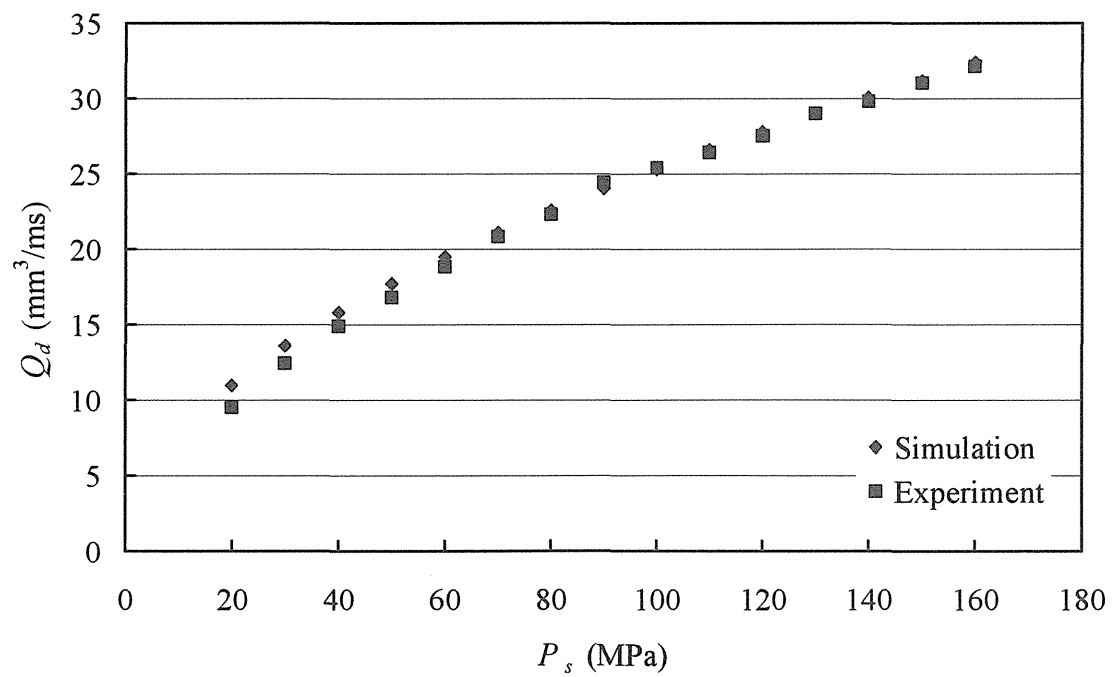
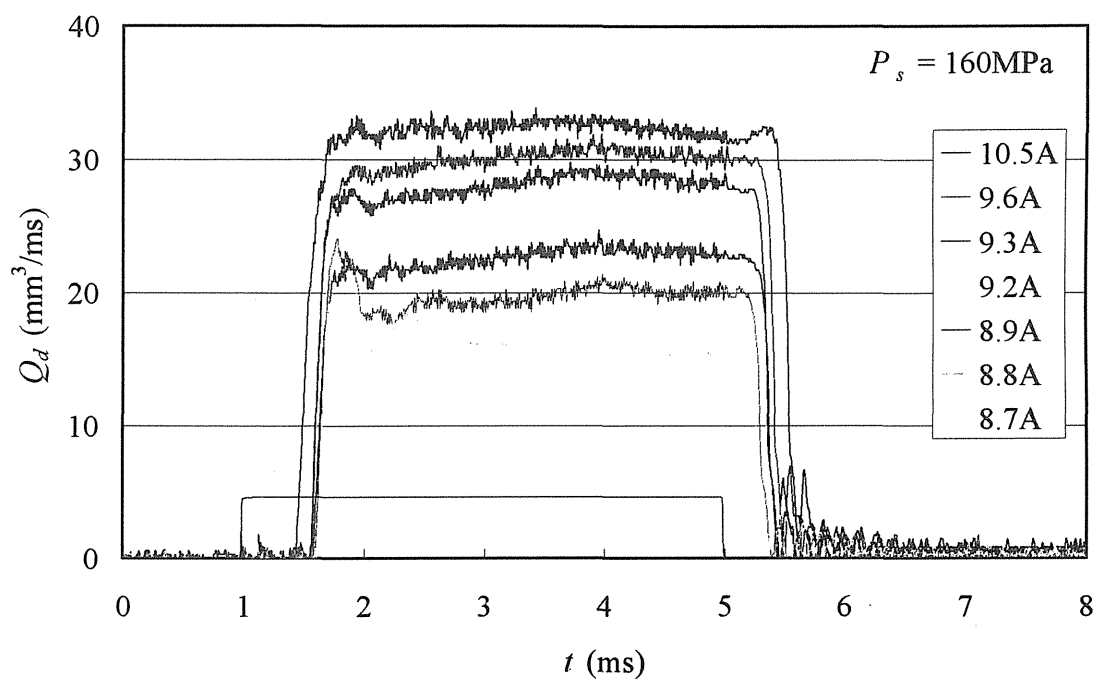
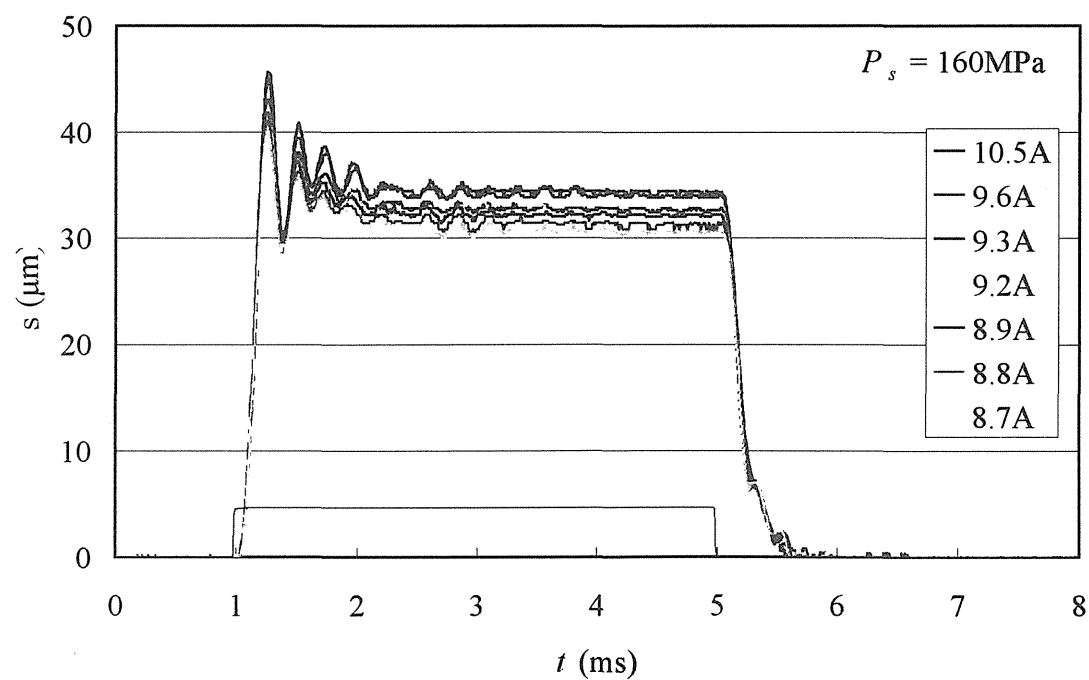


図 6-17 各コモンレール圧力における最大噴射率



(a) 励磁電流による噴射率の変化



(b) 励磁電流によるパイロット弁リフト量の変化

図 6-18 最大噴射率の制御特性

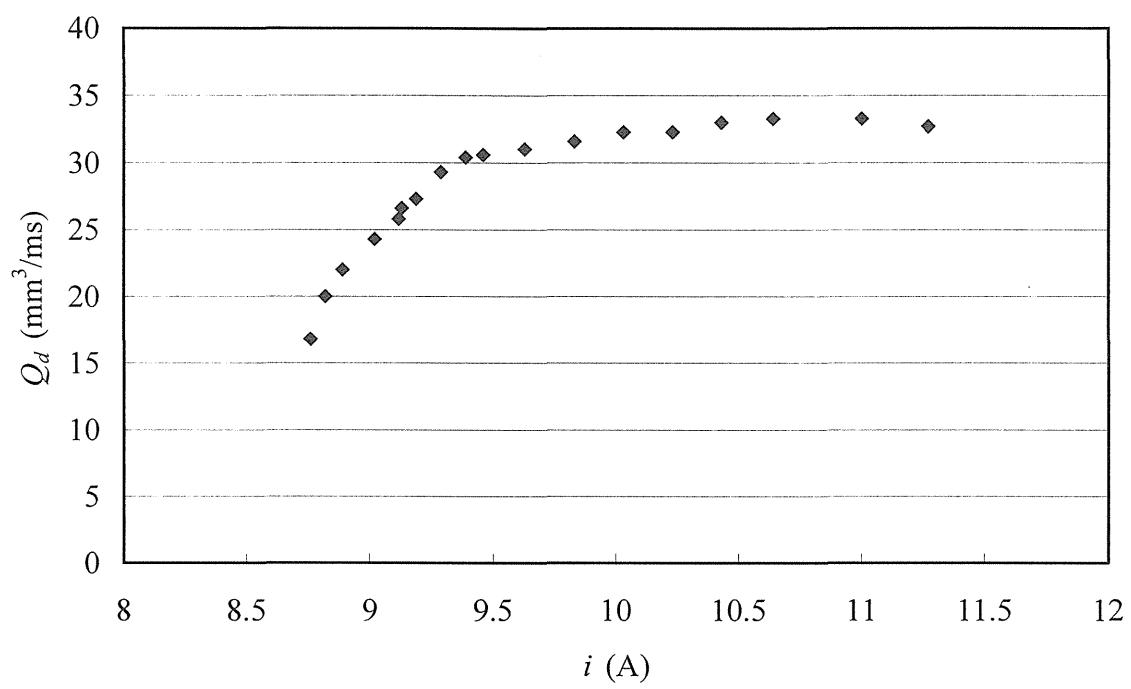


図 6-19 各励磁電流における最大噴射率

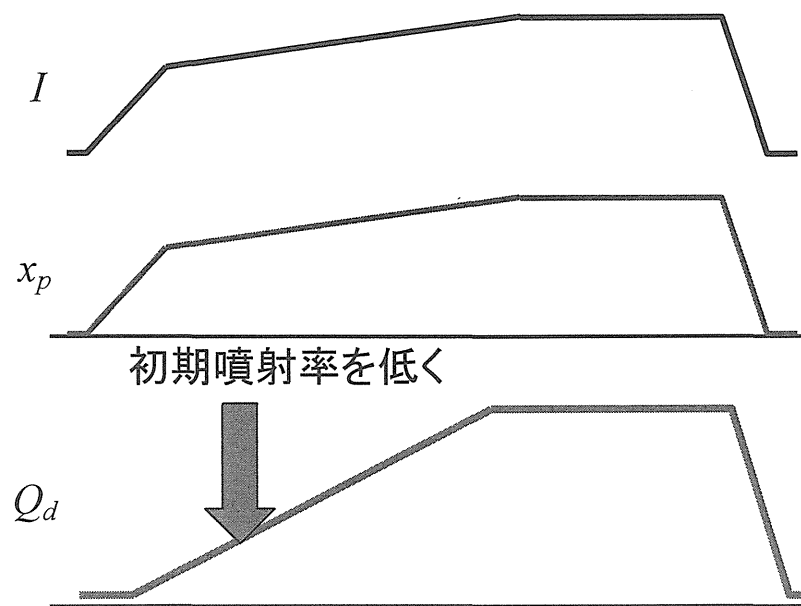


図 6-20 NOx 低減に有効な噴射率波形

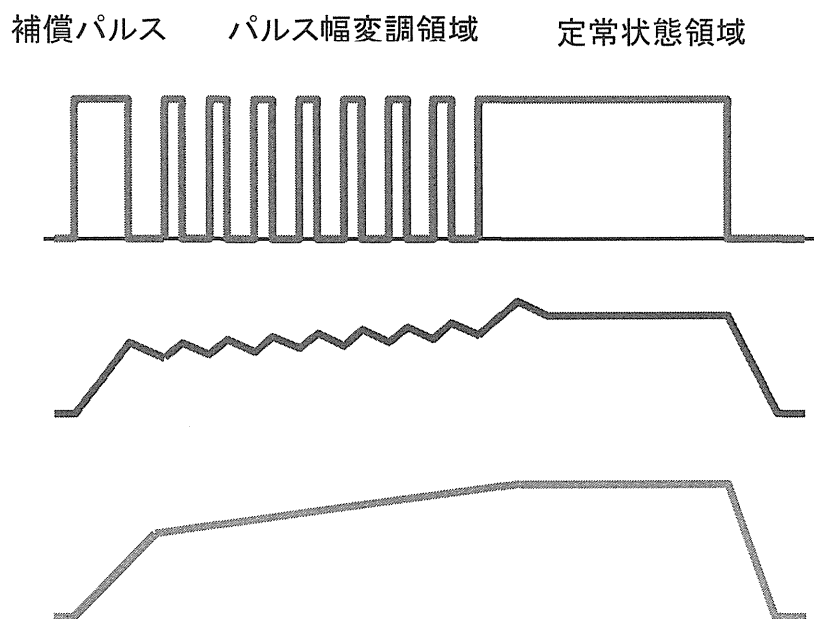


図 6-21 GMA 駆動ソレノイド励磁方法

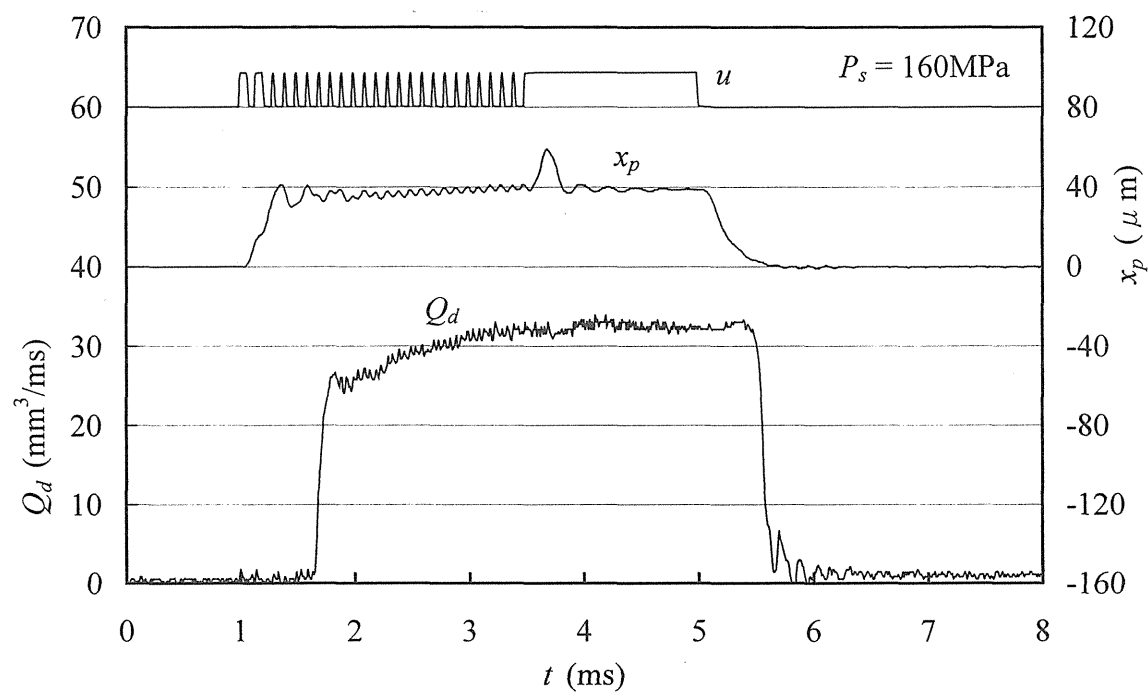


図 6-22 噴射率波形の制御 (パターン 1)

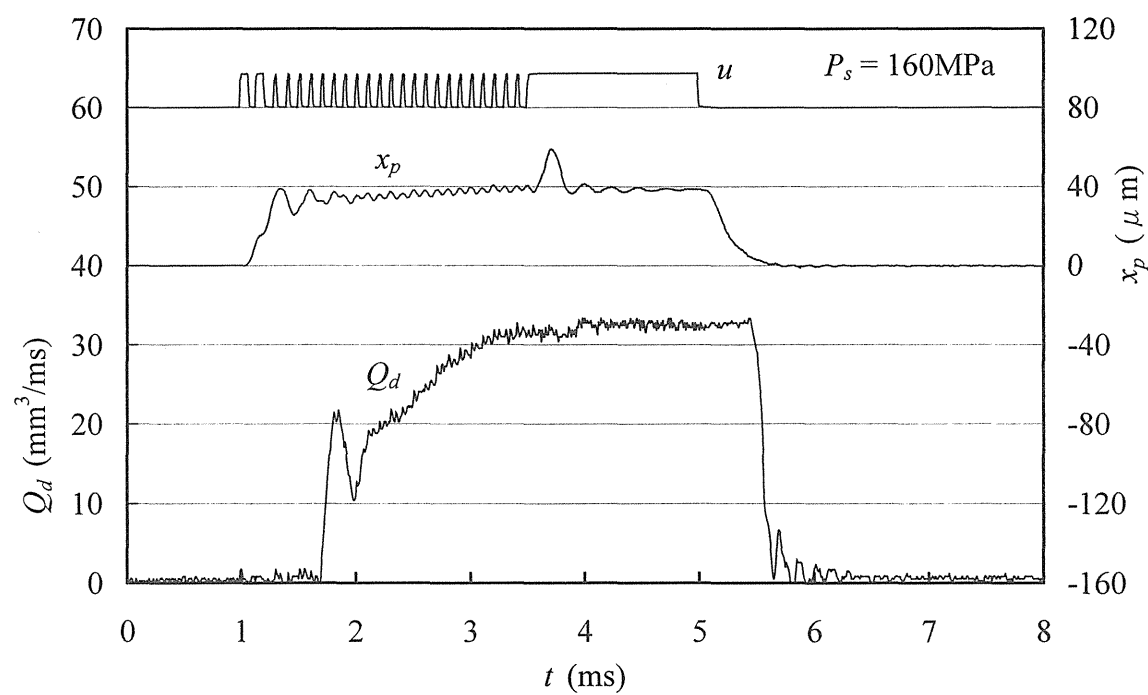


図 6-23 噴射率波形の制御 (パターン 2)

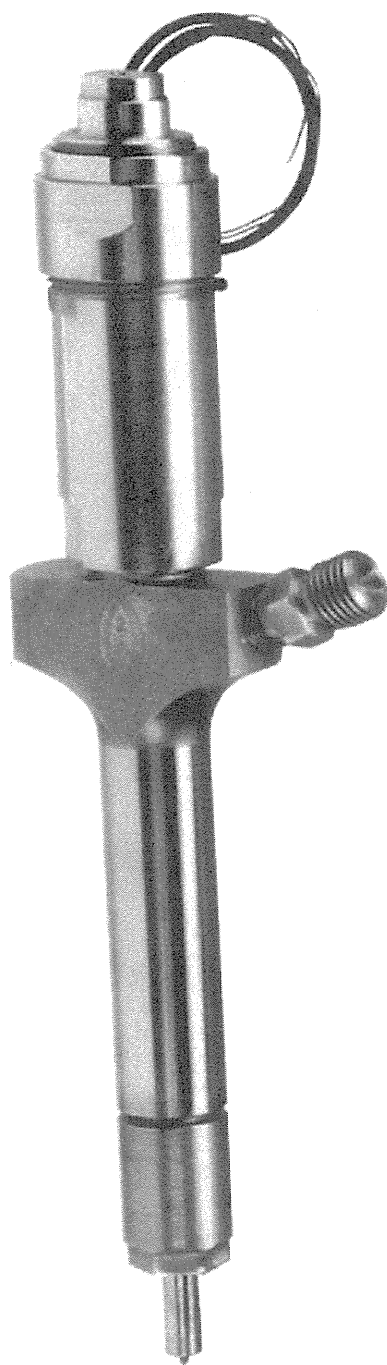


図 6-24 タンデム形超磁歪アクチュエータ駆動電子燃料噴射弁

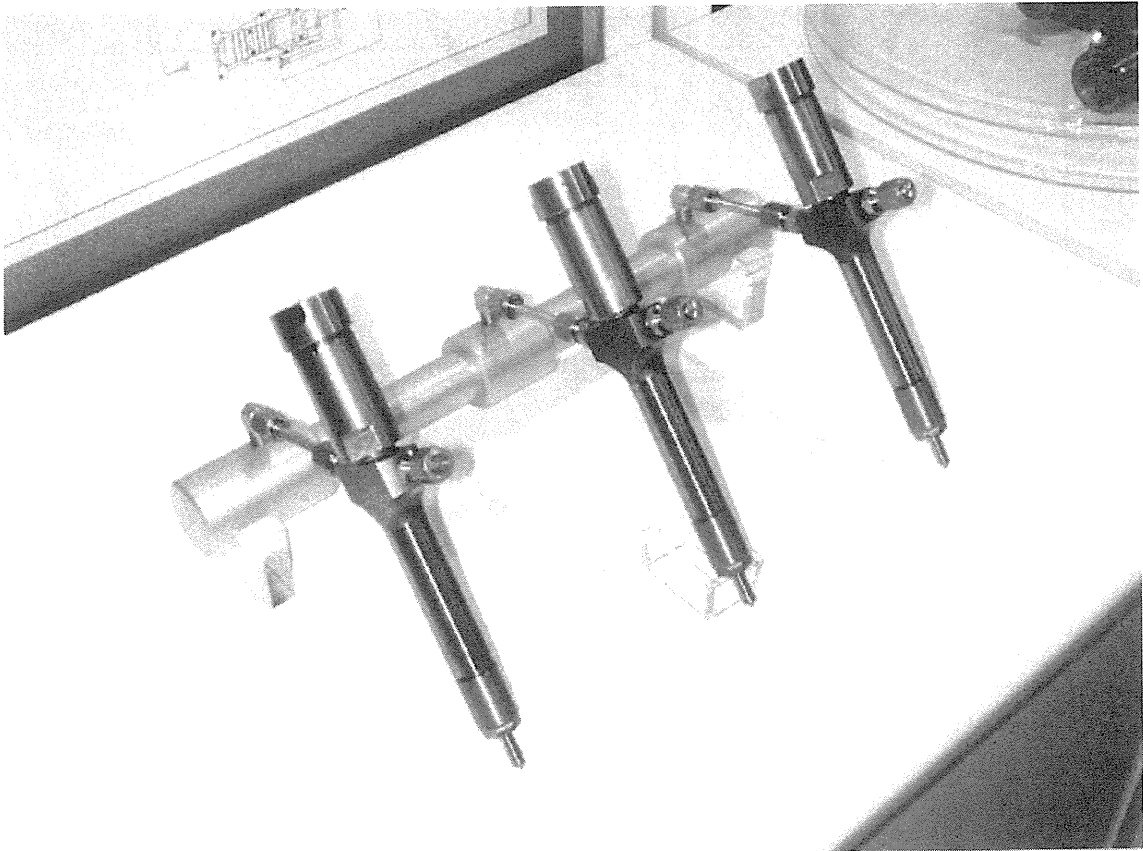


图 6—25 燃料喷射弁

第 7 章

結 論

7・1 結論

精密位置決め機構への対応として、高精度・高応答な制御用アクチュエータが必要とされている。本論文では、この要求にこたえるため、超磁歪材料によるアクチュエータ開発に付いて論じ、高速流体制御システムへの適応を行った。

最初に精密位置決め用アクチュエータに関する研究課題を明確にした後（第1章）、超磁歪材料及び超磁歪アクチュエータに関して基本的特性、従来の設計手法をまとめ（第2章）、今回開発したタンデム形超磁歪アクチュエータの開発内容（第3章）及びその高速化（第4章）を行った。さらに、開発したタンデム形超磁歪アクチュエータによる応用例として、高速サーボ弁（第5章）及びディーゼルエンジンコモンレール用燃料噴射弁の開発内容を示した。

以上より得られた結論は、

[1] 超磁歪材料の強度特性及び磁気特性について（第2章）

- (1) 今回用いた粉末冶金法による超磁歪材料の磁気特性は、Bridgman 材と同様に、非線形性、ヒステリシスがある。
- (2) 比透磁率は 8 程度でかなり低い。
- (3) 圧縮強度は約 404MPa、弾性率は約 80MPa である。
- (4) 圧縮強度データをワイブルプロットしたところ形状母数は 10:1 で、圧縮強度は bridgman 材と同程度のばらつきであることが分かった。

[2] タンデム形超磁歪アクチュエータの開発内容について（第3章）

- (1) コイル内に超磁歪材料をホルダーを介してタンデムに配置することにより、変位はそのままで半分の長さに小型化できた。
- (2) ホルダーの熱膨張を利用したキャンセル機構で、温度ドリフトを押さえる事が出来た。
- (3) 超磁歪材料を 3 本 1 セットで設置することで、超磁歪材料にかかる曲げモーメント発生を押さえ、信頼性の高い設計が出来た。

[3] タンデム形超磁歪アクチュエータの高速化について（第4章）

- (1) 静磁場解析から、磁気回路設計及びバイアス磁場の設計手法に関してまとめた。
- (2) アクチュエータの動的モデルを算出し、動磁場解析から、アクチュエータ高速化

に対する渦電流の影響を明らかにした。

- (3) アクチュエータの応答特性は、ソレノイドのインダクタンスの大きさが支配的なことを明らかにし、過励磁駆動法およびコイルの再設計により、応答時間 0.3msec を達成した。

[4] 高速サーボ弁への適用に関して（第 6 章）

- (1) スプール駆動にタンデム形超磁歪アクチュエータを適用し直動化かしたパイロット弁による 2 段弁形高速サーボ弁を開発した。
- (2) 流量レベル 50L/min のサイズにおいて、振幅比 -3dB および位相遅れ 90° の周波数応答がそれぞれ 200Hz 及び 400Hz と、直動形サーボ弁としてはこれまでにない高応答化を達成した。

[5] ディーゼルエンジンコモンレール用燃料噴射弁への適用に関し（第 6 章）

- (1) 燃料噴射弁駆動パイロット弁にタンデム形超磁歪アクチュエータを適用し、コモンレール用電子燃料噴射弁を開発した。
- (2) コモンレール圧力 160MPa において開弁時 0.3ms, 閉弁時 0.5ms の噴射応答性が得られた。
- (3) パルス幅変調した噴射指令信号で GMA を駆動することにより、パイロット弁にオンオフ弁を用いた従来のコモンレール用電子燃料噴射弁では困難であった、噴射率形状の連続可変制御が可能であることを示した。

7・2 今後の展望

本研究で確立されたタンデム形超磁歪アクチュエータは、精密位置決め制御用アクチュエータ、特に高速流体制御システムを構築するのみならず、従来のサーボ弁では困難であった大流量高応答の直動形サーボ弁構成が可能となり、また現在懸案となっている環境対応形ディーゼルエンジンのコモンレール用燃料噴射弁の高性能化に対し、新しい革新的技術開発となることが期待される。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、超磁歪材料の強度特性試験にご指導を頂いた、北海道大学大学院工学研究科の中村 孝助教授に感謝するとともに、超磁歪材料を提供頂いたTDK（株）基礎材料研究所の森 輝夫殿に感謝します。

また、ディーゼルエンジンの技術動向に関する討論を頂いた、（株）いすゞ自動車中央研究所の西村輝一殿に感謝するとともに、本実験とボンドグラフ解析に協力をえた、横浜国立大学 大学院生の中保友直君、並びに、学部4年の伊藤 希さんに感謝します。