

低差圧で駆動される流体増幅器の開発

赤木 徹也*・堂田周治郎・松下 尚史

*岡山理科大学大学院工学研究科

岡山理科大学工学部機械工学科

(1993年9月30日 受理)

1. 研究の背景

近年、航空機の軽量化に伴い、構造材料がアルミ合金を主体とする金属材料から、比強度の高い炭素繊維などの非金属材料にとってかわられるようになってきた。このため、機内の制御装置は雷やレーダ波などの電磁干渉を受け易くなっている。今年の2月、米国ケネディ空港で、着陸しようとしたDC10型旅客機が乗客のCDプレーヤの影響で墜落寸前の危機に見舞われるという事件があった。また、工場においてはモータ等の各種電磁機器が使われており電磁ノイズによる電子制御回路への電磁障害が存在する。一方、身近な例では、スタンガン(対暴漢用電気銃)等を用いて自動販売機の電子回路の機能を麻痺させ、商品を取り出すなどの犯罪も報告されている。このような環境障害が存在する所では、制御信号として光を用いることが有効であり、中田ら^{1,2)}が提案しているような光サーボシステムの構築が強く望まれる。光サーボシステムとは電気を介在させたシステムの一部あるいはすべてを光に置き換え、現在のサーボシステムの限界である電磁障害内での使用における諸問題を打破しようとする新しい概念のサーボシステムである。

著者らは、フルイディクス素子を利用し^{3,4)}、レーザ光信号を流体圧力信号に変換する光一流体変換素子の開発を行い、これまでに動作原理の解明や特性解析⁵⁾を行い、光パワーに正比例した出力差圧特性を有する変換素子の開発⁶⁾を行ってきた。

本研究では、光一流体変換素子を用い、フィードバック回路を含めたシステムの全てを光化した光一流体サーボシステム^{7,8)}を考えている。その構成を台車の位置決め制御を一例としてFig.1に示す。この制御システムにおける制御の流れは以下の通りである。まず光ファイバから出た光信号が目標値との偏差に相当する光信号となり光一流体変換素子に入力される。変換素子で光信号に比例した流体圧力信号に変換され流体パワー増幅器を介し流体アクチュエータの作動圧力にまで増幅される。そして増幅された流体パワーは空気圧シリンダに供給され、制御対象である台車を駆動させる。さらに、制御量である台車変位は変位-光変換器である回転型NDフィルタ等を介して再び光信号に変換され、光一流体変換素子に光フィードバックされることで台車の位置決め制御を行うものである。これらの光信号は光ファイバや光-電気変換器を介して、環境障害のない遠く離れた所に設置さ

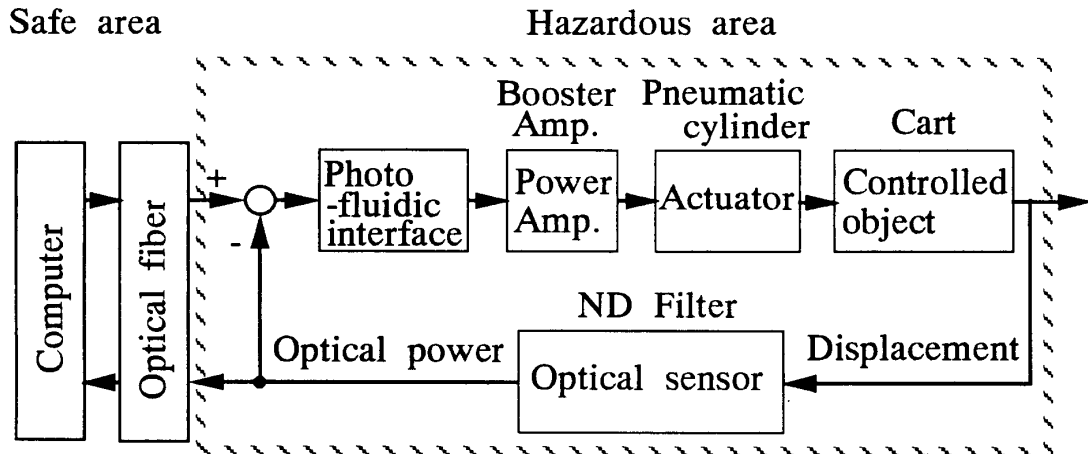


Fig. 1 Concept of optical servo system using photo-fluidic interface

れたコンピュータに入出力され、監視や複雑な制御則の実行に利用される。

このような光一流体サーボシステムの実現について、一番の問題点は、光一流体変換素子の出力パワーが小さく、直接市販のブースターリレーや流体アクチュエータなどを動かすのが困難であるということである。実際の例を挙げると、シリンダ内径16mm、ストローク60mmのペン型シリンダ（コガネイ製）を駆動させるためには、最低でも20kPaの圧力差が必要であり、ブースターリレー（例えばSMC製IL100）を用いて流量増幅を行うとしても100kPa程度の圧力が必要である。しかし、光一流体変換素子の出力差圧は最大0.15kPaと小さく⁹⁾、層流比例形素子を用いて増幅を行ったとしても差圧で4.5kPa程度の出力しか得られず、直接駆動用圧力として使用するのには困難である。また、変換素子のノズル断面積が0.1mm²以下と小さく層流域で使用するため、素子の出力流量は大きなものが得られず、アクチュエータ等を直接駆動しようとする大きな動作遅れを生じ、サーボ系を構成するのは困難である。それゆえ、微小流体パワーを増幅し、アクチュエータやブースターリレー等の作動圧まで増幅することができる流体増幅器の開発が必要である。山本ら⁹⁾はビニール膜を用いた単動式の膜型増幅器の試作を行っているが、本研究では単動式の欠点をカバーすることのできる差圧駆動の複動式膜型増幅器を中心にいくつかの流体増幅器の開発を試みる。

2. 単動式膜型増幅器

2.1 増幅器の構造および動作原理

Fig. 2に試作を行った単動式膜型増幅器の構造図を示す。外径60mm、内径50mmの亚克力製の円筒を用いて、ラテックス製ゴム膜（厚さ0.02mm）をはさみ、一方の側に圧力室を設け、その反対側からノズルを突きだした構造となっている。膜の中心部にはノズル噴流による膜の変化を防ぐため、直径6.0mm、厚さ1.0mmの亚克力プレートを取り付ける。ノズルは内径1.0mm、2.0mm、3.0mmのものを用いる。

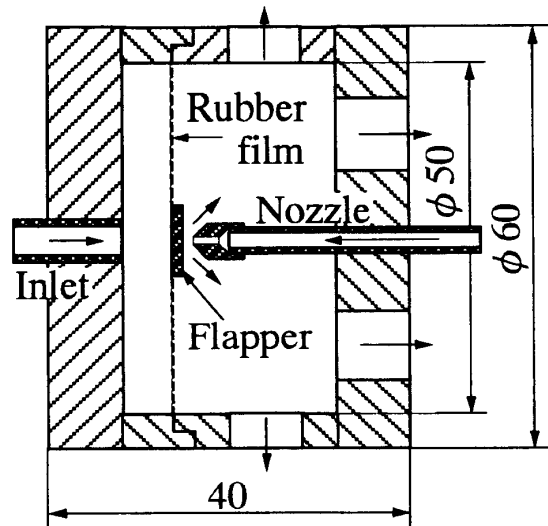


Fig. 2 Structure of a tested single acting booster amplifier

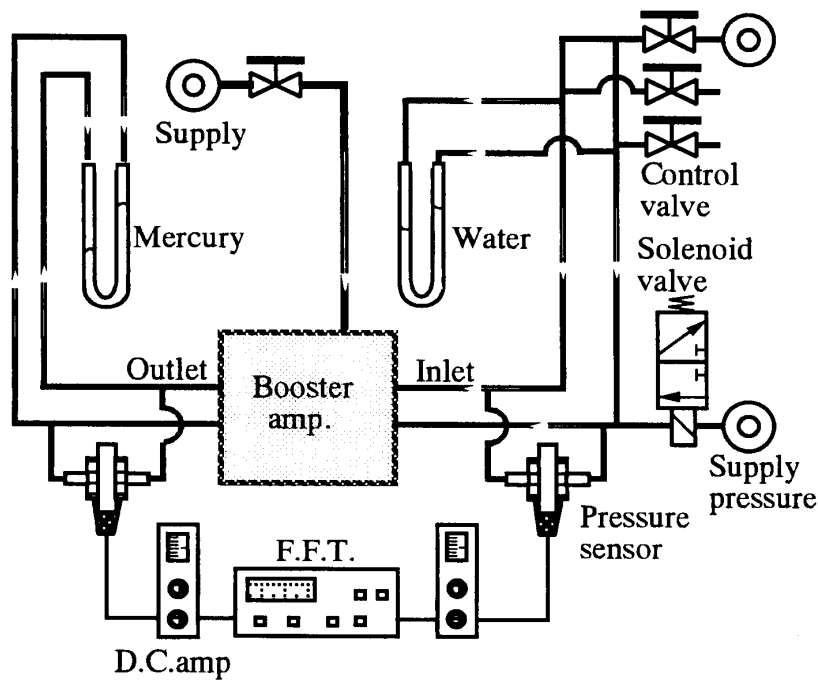


Fig. 3 Experimental equipment for booster amplifiers

動作原理は、膜内の圧力室に微小圧力を加えることにより、フラップの代用である膜をその発生力（圧力×断面積）により変位させる。この変位量がノズルとフラップとの間隙を変え、ノズル・フラップの原理から出力背圧に変化が生じるというものである。

2.2 実験装置および方法

Fig. 3 に膜型増幅器の静特性および動特性実験の実験装置を示す。タンクからの圧縮空気はバルブを介して増幅器の供給口に入る。供給圧力は水銀柱マンメータで測定される。増幅器の入力圧（または差圧）は通気バルブで調整され、水柱マンメータで測定される。増幅器からの出力差圧は水銀柱マンメータで測定される。静特性実験は膜内の圧力室内のゲ

ージ圧を一定に保った状態から入力差圧を変化させ、それに伴う背圧すなわち出力差圧を測定することによって行われる。またノズルとフラップ膜との初期の間隙を一定量変化させた場合においても上記と同様の測定を行う。動特性の実験には入力口と出力口に取り付けた2つの差圧変換器（豊田工機製 DD102S）を用いる。すなわち、電磁弁（TAIYO製 SP310-NNO）を用いてステップ状に入力差圧を増幅器の入力口に加え、それに伴う入出力圧力の時間変化を圧力変換器、DCアンプを介してデジタルオシロスコープで記録する。

2.3 静特性

Fig. 4 に単動式膜型増幅器の膜内入力圧に対するノズル背圧の関係を示す。これは供給口の絞り径を0.5mm と一定とし、ノズル内径を3.0mm, 2.0mm, 1.0mm と変えた場合の実験結果である。ノズル内径が3.0mm の場合、フラップ膜とノズルの間隙を1.0mm, 2.0mm, 3.0mm と変えた。出力背圧は飽和するまで測定を行った。○はノズル内径が1.0mm の場合、△は2.0mm の場合、□は3.0mm の場合を示し、◇と■はそれぞれノズル内径3.0mm の場合で間隙2.0mm, 3.0mm の場合を示す。いずれの場合も入力圧にほぼ比例した出力圧となっている。ノズル内径が3.0mm, 2.0mm, 1.0mm の場合の増幅率である圧力ゲイン（図の傾き）はそれぞれ75, 200, 400とノズル内径に反比例して高くなっている。また Fig. 4 の□, ◇, ■に示すように、フラップ膜とノズルとの間隙が大きくなると不感帯が増え、間隙が多少変化しても線形域での圧力ゲインはほとんど変化しないことがわかる。以上の特性にも見られる様に、この増幅器はノズル・フラップ機構による増

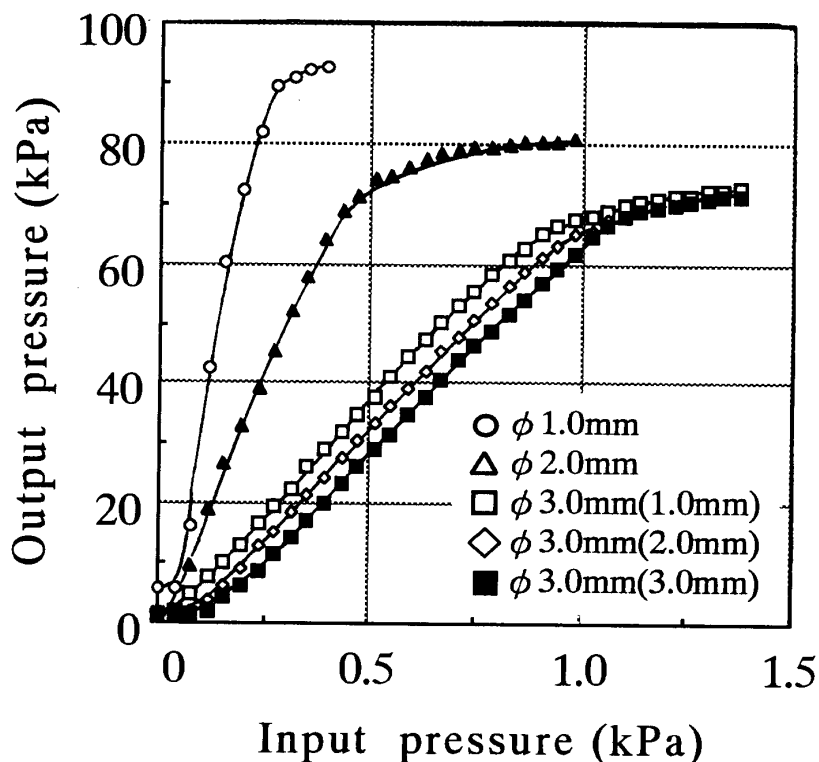


Fig. 4 Relation between input and output pressure of a single acting booster amplifier

幅を行っているため、ノズルと膜との間隙が出力背圧を決定する大きなパラメータとなる。このため、閉ざされた膜室に入る作動流体の熱膨張が出力背圧に大きな変化をもたらす危険性があり、周囲の温度変化に弱いことが予想される。

3. 複動式膜型増幅器

3.1 構造と動作原理

作動流体の熱膨張による増幅器の特性変動を防ぐため、改良を行った複動式膜型増幅器 (TYPE-I) の構造を Fig. 5 (a) に示す。中心部のラテックス製ゴム膜を両側から同素材のシール用ゴム膜ではさみ2つの圧力室を構成し、その両側からノズル(ノズル内径1.0mm, 供給圧絞り径0.5mm)が突きだした構造となっている。膜と膜との間およびシール用膜の両側は、外径60mm, 内径50mmの円筒形アクリル板によって仕切られ、またシール用の膜の両側は真鍮製のスペーサで両側に膨れないように拘束されている。そして三枚の膜は中心部で接合され、その両側にはノズル噴流による膜の変形を防ぐためのアルミ板のフラップが取り付けられている。便宜上、中心の膜に対して、左側圧力室の入力圧を P_{il} , 右側の入力圧を P_{ir} , 左側ノズル背圧を P_{or} , 右側ノズル背圧を P_{oi} と呼ぶことにする。

動作原理は以下の通りである。2つの圧力室に微小差圧を加え三枚重ねの膜を変形させることによりフラップを左右に動かし、左右のノズル背圧を変える。

この差圧によって動く複動式は単動式に比べ次のような利点が考えられる。

- 1) フラップが共通なので差圧のゼロ点のドリフトや動作遅れの違いによる振動が発生しにくく、調整も容易である。
- 2) 差圧で駆動するので周囲の温度に影響されにくい。

Fig. 5 (b) に複動式膜型増幅器 (TYPE-II) の構造を示す。この増幅器も前述のものと同

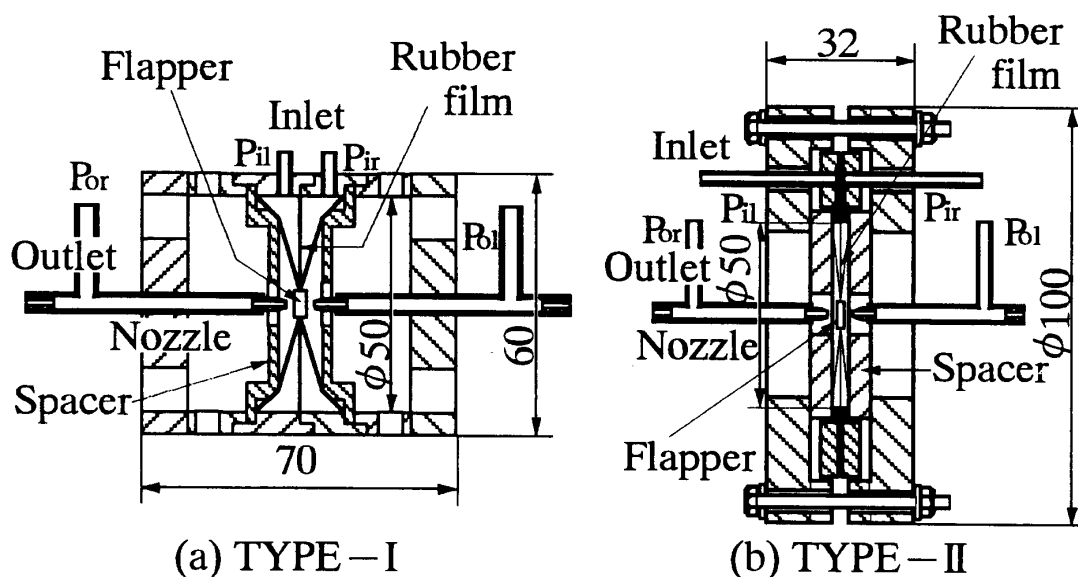


Fig. 5 Structure of two tested double acting booster amplifiers

様に3枚重ねのゴム膜によって2つの圧力室を作り、その圧力室に差圧を加えることによって膜を変位させ、左右のノズル背圧を変える。TYPE-Iとの相違点は膜と膜の間のアクリルプレートに厚さ0.1mmのものを用い、圧力室内の容積を小さくした事であり、増幅器の速応性を高めようとしている。

3.2 静特性

Fig. 6に増幅器 (TYPE-I) の膜内入力差圧に対する出力背圧差の測定結果を示す。この実験結果は3.2節で示した実験装置および方法により、入力差圧 ($P_{ir}-P_{il}$) が0の状態 で出力差圧 ($P_{or}-P_{oi}$) が0になるようにノズルとフラップ膜の位置を調節し、その状態から入力差圧を $+0.4\text{ kPa} \sim -0.4\text{ kPa}$ まで 0.04 kPa 毎に変えた時の出力差圧を測定した結果である。初期の膜内入力ゲージ圧 (P_{il}) は 2.7 kPa に設定している。○はノズル供給圧 98 kPa , △は 147 kPa , □は 196 kPa の場合を示す。グラフ値はヒステリシスがほとんどないため入力圧を上下降させた場合の結果を平均したものである。圧力ゲインはノズル供給圧 196 kPa のとき最大で400倍となり、ノズル供給圧が上昇すると出力差圧の飽和値も増し、入力差圧に正比例した領域も広がる。

Fig. 7に増幅器のフラップ膜とノズルとの間隙が入出力特性に及ぼす影響を示す。○はノズルと膜との間隙を初期状態に設定した場合, △はノズルと膜の間隙を初期状態から左右とも 0.025 mm 膜に近づけた場合, □は 0.025 mm 遠ざけた場合を示す。間隙を狭くすることによって圧力ゲインは多少上昇するが、線形な領域は少し小さくなる。また、間隙を広くすることによって、線形な領域は大きくなるが圧力ゲインは小さくなる。また間隙を広

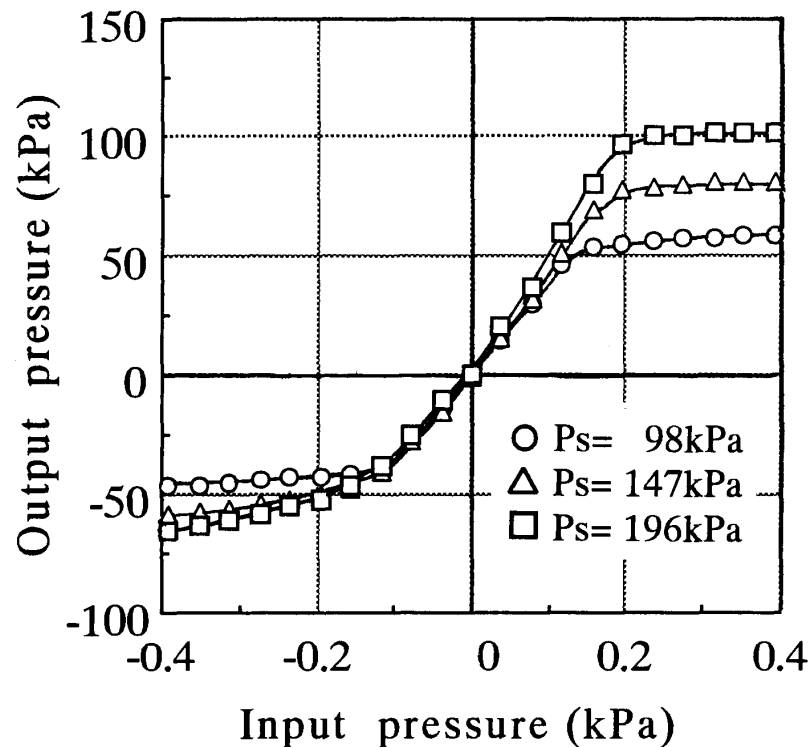


Fig. 6 Relation between input and output pressure of the booster amplifier (TYPE-I)

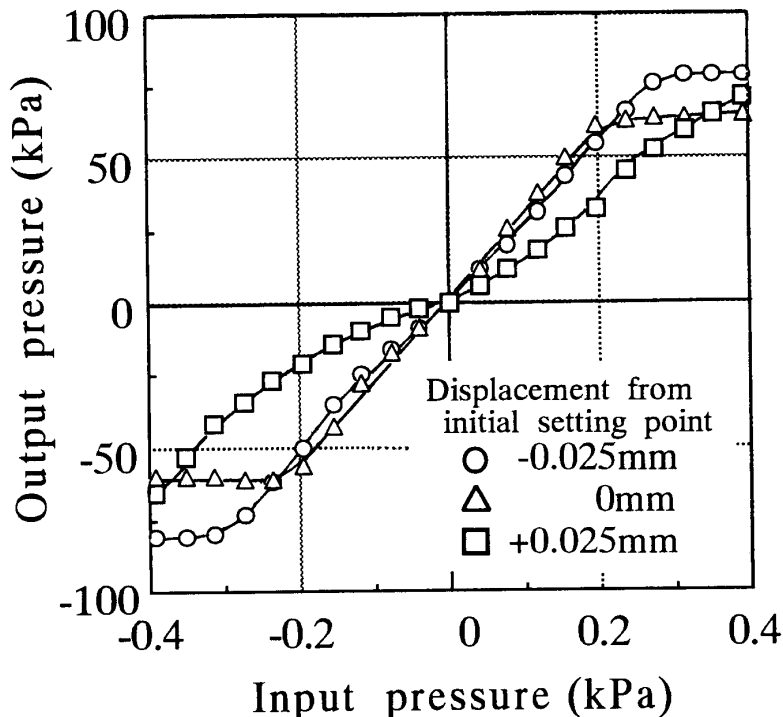


Fig. 7 Effects of nozzle-flapper distance on the characteristics of the booster amplifier (TYPE-I)

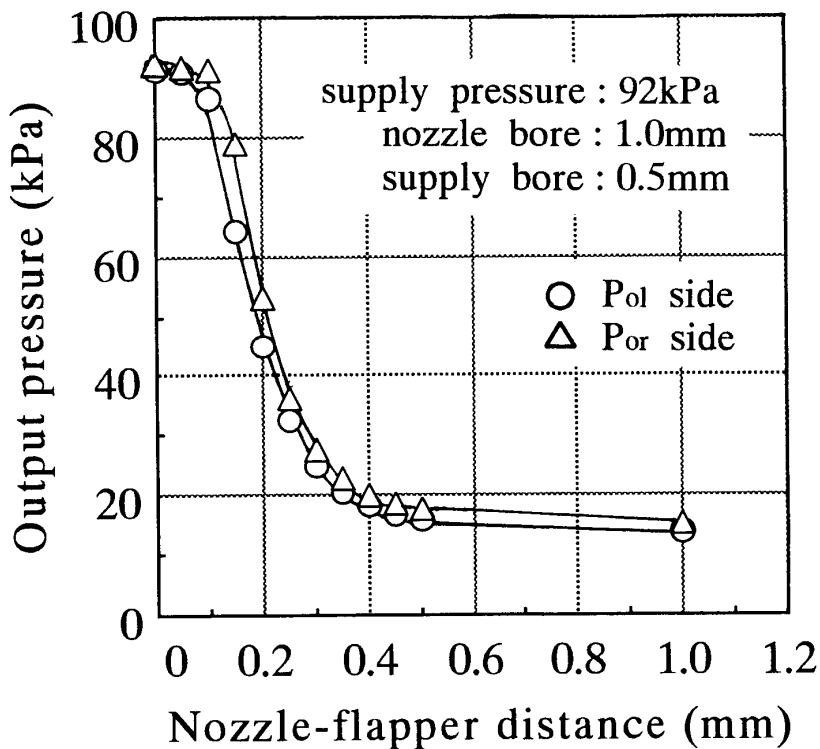


Fig. 8 Relation between nozzle-flapper distance and output pressure

くすると線形性が悪くなる。これらの特徴のうち圧力ゲインが変わる原因を Fig. 8 に示すノズルフラップ間隙-背圧特性を用いて説明する。図に示すように、間隙-背圧の傾き(ゲイン)は一定ではなく間隙によって変化する。膜変位はフラップ間隙が変わっても入力圧

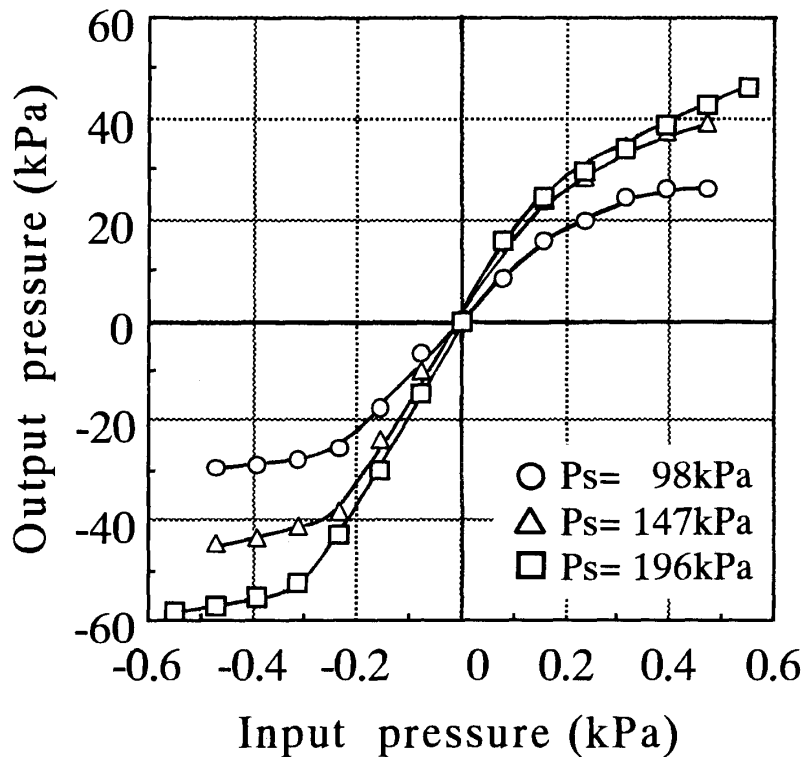


Fig. 9 Relation between input and output pressure of the booster amplifier (TYPE-II)

力差に対して同じように変位するため、初期のフラップ間隙が変わると、傾きが変わり、増幅器の圧力ゲインが変化することになる。また、間隙を大きくすると直線性が悪くなる原因としては広範囲のフラップ間隙を使用しているため、前述したようなゲイン変化が広範囲の膜変位によって生じるためと考えられる。これらのことから、フラップ間隙を変化させることで、ある程度のゲイン調整が可能であると考えられる。

Fig. 9に増幅器 (TYPE-II) の膜内入力差圧と出力背圧差の関係を示す。○はノズル供給圧 98kPa, △は 147kPa, □は 196kPa の場合を示す。ノズル供給圧が 196kPa のとき、ゲインは最大で 200 倍となり TYPE-I の特性に比べて低下しているが、TYPE-I と同様にほぼ入力差圧に正比例した出力差圧特性が得られている。圧力ゲインが低下した理由としては、膜室容積を小さくしたためフラップ膜の変位量が減少し、それに伴い左右のノズル間隙が小さくなったためである。また、TYPE-I の特性と同様に膜とノズルの間隙を変えることによって圧力ゲインが変えられることも確認している。

3.3 動特性

動特性実験は、速応性の改善を行った複動式膜型増幅器 (TYPE-II) について、2.2 節で述べた実験装置および方法で行った。ステップ状の入力差圧の大きさは 3 種類 (123 Pa, 235 Pa, 328 Pa) について実験を行った。

Fig. 10 に複動式膜型増幅器にステップ状入力圧力 (235 Pa) を印加した場合の出力差圧の応答結果を示す。上図が入力差圧、下図が出力差圧を示す。出力差圧の時間変化を見る

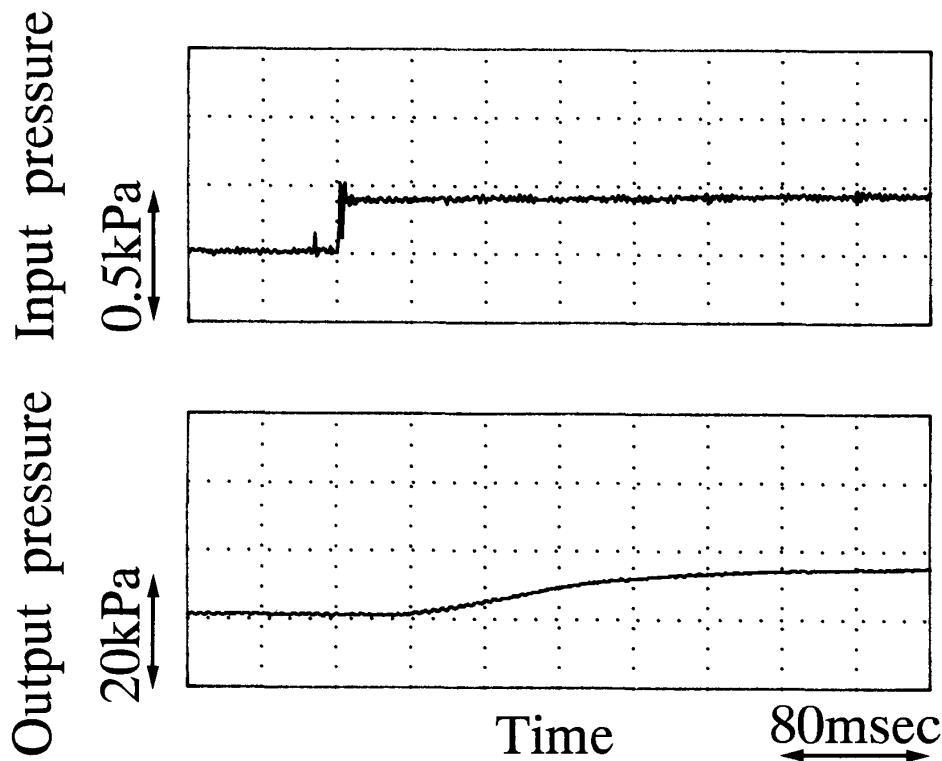


Fig. 10 Step response of the booster amplifier (TYPE-II)

Table 1 Time constant and dead time

Input pressure (Pa)	Time constant (msec)	Dead time (msec)
123	90.5	10.9
235	91.1	39.3
328	92.8	39.1

とむだ時間と一次遅れから成る要素の応答を示している。このような応答波形から求めた時定数およびむだ時間を入力差圧の大きさをパラメータとし Table 1 に示す。入力差圧が小さい場合 (123 Pa) のむだ時間が小さい理由は、入力圧力に対する膜内容積変化による差異であると考えられる。すなわち、入力圧が小さい場合、容積は最大値 (スぺーサによって仕切られた容積) まで達しない。このため膜内容積内での圧力変化の遅れが出力差圧の応答においてむだ時間として現れたものと考えられる。このことは、入力差圧が 235 Pa, 328 Pa の場合にほぼ同様なむだ時間を示していることから推察できる。

また応答速度に関しては、市販の電空比例弁 (例えば、SMC 製 VEP 3120) のむだ時間 30 msec, 時定数 30 msec と比較すると、膜型増幅器のむだ時間が 40 msec, 時定数 90 msec と、

むだ時間はほぼ同様であるが、時定数では3倍程度のひらきがあり、通常の電気-空気圧サーボ弁に比べて応答は少し遅い。増幅器の時定数は膜変位によって生じる左右の膜内圧力室の容積に関係することから、膜内容積 (Fig. 5 (b) で示したスペーサで囲まれた容積) を小さくすることで、速応性の改善がはかれると考えられる。

4. 結 言

弾性ゴム膜を用いたノズル・フラップ形式の単動式膜型増幅器を試作し、静特性を調べた結果、増幅率にあたる圧力ゲインが400倍と高く、ヒステリシスもほとんどない良好な特性をもつ増幅器が得られた。しかし、単動式を2つ用いたものは、複動式に比べて温度変化に弱い等いくつかの欠点が予想される。そこで、差圧駆動の複動式膜型増幅器 (TYPE-I) を試作し、圧力ゲインが400倍と高く、入力差圧に対して正比例した出力特性を有するものが得られた。またノズルと膜との間隙を変化させることで、圧力ゲインおよび飽和位置をある程度変えることが可能であることがわかった。また同機の速応性を高めるため、圧力室の容積を小さくした複動式膜型増幅器 (TYPE-II) を試作した結果、ステップ応答において、むだ時間30msec, 時定数90msec が得られ、通常の空気圧制御系に対して適用可能であることを確認した。

最後に、本実験に協力された本学卒業生の西尾浩一氏 (現在, ㈱コナミに勤務) に対して厚く感謝します。

参考文献

- 1) 中田 毅, 曹 東輝, 木村 誠, 謝 啓裕, 山内 洋, 山内 隆: 光サーボシステムの基礎的研究 (光アクチュエータへの寄与), 日本機械学会論文集 (C編), 第57巻, 542号, 116/121 (1991)
- 2) 中田 毅, 曹 東輝, 木村 誠, 謝 啓裕: 光サーボシステムの基礎的研究 (PLZT 素子における光起電力効果の電氣的モデル), 日本機械学会論文集 (C編), 第58巻, 552号, 2513/2518 (1992)
- 3) J. O. Gurney: Photofluidic Interface, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.106, No.3, 90/97 (1984)
- 4) B. Hockaday et al.: A Novel Opto-Fluidic Interface, The Journal of Fluidic Control, Vol.16, No. 2-3, 17/25 (1986)
- 5) 堂田 周治郎: 光一流体変換素子の原理と特性, 機械の研究, 第44巻, 第2号, 264/270 (1992)
- 6) 堂田 周治郎, 東海 正明, 高森 年: 光一流体変換素子に関する研究, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No.7, 780/786 (1990)
- 7) S. Dohta, H. Matsushita and T. Akagi: Photo-Fluidic Interface and Its Application to an Optical Servo System, Proceedings of the Second Asian/Pacific International Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, 199/204 (1993)
- 8) 堂田 周治郎, 松下 尚史, 高森 年: 光サーボシステムに関する研究 (第1報: 光一流体変換素子を用いた光サーボシステムの試作), 日本機械学会講演論文集, No.935-1, 313/315 (1993)
- 9) K. Yamamoto and O. Oyama: Opto-pneumatic Control Robot Arm, Proceedings of the Second JHPS International Symposium on Fluid Power, 755/760 (1993)

Development of the Fluid Booster Amplifier Driven by Low Differential Pressure

Tetsuya AKAGI*, Shujiro DOHTA and Hisashi MATSUSHITA

Department of Mechanical Engineering,

**Graduate School of Engineering,*

Okayama University of Science,

1-1, Ridai-cho, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1993)

Today a structural material of an aircraft tends to use a nonmetal material like CFRP (carbon fiber reinforced plastic) in stead of metal material to save the weight. Then, the electronic control circuit is more affected by electromagnetic noise, thunder, radar and so on.

We consider that it is useful to use optical control signal in stead of electrical control signal in such an environment. For this reason, it has been desired to realize an optical servo system. An optical servo system is a novel control servo system in which a part or all of the electric or electronic components of present control system are replaced with optical components in order to break through the limit of present electronic control system. We aim to develop the optical servo system using a photo-fluidic interface which converts optical control signal to pneumatic or hydraulic control signal.

We had investigated the photo-fluidic interface theoretically and experimentally. And we developed the interface that the differential output pressure was proportional to input optical power. However, output fluid power from the interface is too low to drive an actuator directly. Therefore we need to develop a fluid booster amplifier driven by very low differential pressure.

In this paper, we developed and tested two types of amplifier; single and double acting booster amplifier. This amplifier consists of rubber film as a flapper and nozzle. We investigated their static and dynamic characteristics. As a result, we found that the double acting booster amplifier was more useful to amplify very low differential pressure. This has following advantages. 1) Drift of zero output differential pressure is small because of a common flapper. 2) This type is less sensitive to the temperature change because it is operated by the difference of input pressure. To construct the optical servo system using this amplifier is our next future study.