

流体制御素子とその応用について

大阪府立大学工学部航空工学教室* 津 村 俊 弘

1. ま え が き

最近流体制御素子, 流体増巾器, 流体論理素子, なる言葉, さらには「フルイディクス」という言葉が各方面で使われるようになってきた。これらの素子あるいはこれらの素子を含んだ各種制御工学分野を表現する工学は, Control Engineering 誌の特集号が発表¹⁾されるにおよんで, 一層わが国でも関心が深まってきたものである。ここでは流体増巾器とは流体を用いてアナログ動作を行なう素子を, 流体論理素子とはデジタル動作を行なう素子を, 流体制御素子とはこれらを含めて一般に各種制御工学に用いられる流体素子 (検出, 計数, 変換, 記憶, 時間設定, 論理演算, 増巾, 発振などを行なう素子) をよぶことにする。

フルイディクス (Fluidics) は上記流体制御素子およびそのシステム全般を含む工学といえるが, 残念ながらこの言葉の日本語訳がない。カタカナのまま使用するか, 機械試験所尾崎, 原氏らの作った「流子工学」なる名称²⁾が適当であろう。

さてプロセス制御関係では古くから空気圧, 油圧を用いて各種の制御が行われていることはよく知られている。これらの機器も流体素子ということが出来る。しかしこの場合にはこれら流体圧は主として手足として使われており, 制御系を構成する神経や, 命令演算を行わせる部分には電気が使われている。電気を用いて各種演算, 命令などは本来電気の性質を最もよく利用したもので, 電気以外のものでこれに匹敵するものがないと従来考えられていた。ところが流体を流体で制御する素子, 流体のみで構成される論理演算素子, 流体のみを用いたアナログ増巾器が開発されるに及んで, 流体のみを用いて手足のみならず神経や頭脳の働きもさせる全流体制御が急速に脚光をあびてきた。これらは高信頼性, 小形, 安価, 長寿命などの本質的な特長のほかに, 電気を用いずとも制御系を構成できるという特質も加わり, 今後一般産業機械, 工作機械などでも広く用いられることと思われる。

ここでは, ダイアフラム, スプール, ポールなどの機械的変位を利用しないいわゆる流体自身が流体を制御する「純流体制御素子」について, その制御素子としての

原理, 応用について述べることにしよう。機械的な変位を利用した流体制御素子も最近かなり応用されているが, これに関しては文献^{3), 4)}を参照されたい。

2. 純流体制御素子発展の歴史

流体の流れを制御しようとする試みは, かなり古くから行なわれていたようである。1904年には流体力学で有名な Prandtl が広角のディフューザでの流れの研究を行なった際に, ディフューザの一方の境界層に吸い込みを設けることにより, 流体はその方向に付着するという現象を見つけている。図1はその原理図を示すもので, もしディフューザの両側に吸い込みを設けると, 流体が全ディフューザに拡散することが容易に想像できる。これらの現象を利用することによって彼は最初の流体論理素子を作った。⁵⁾

1916年 Tesla は流体の流れの方向によって抵抗の異なるいわゆる流体のダイオードを発明し, これを

「Valvular conduit」と名づけた。⁶⁾ この作用は図2を参照すれば容易に理解できる。

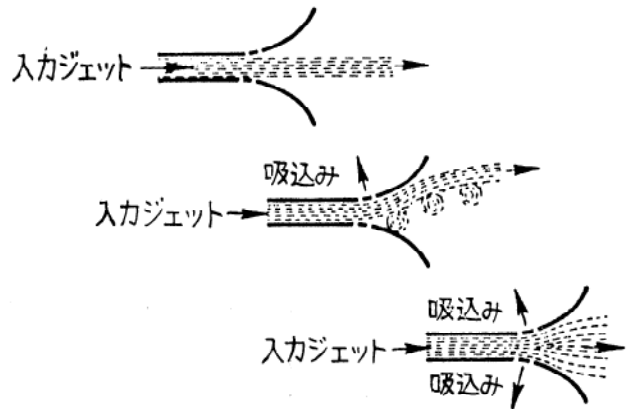
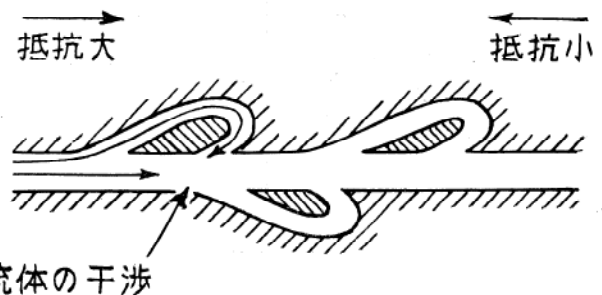


図1 Prandtl の境界層制御



流体の干涉

図2 Tesla Valvular Conduit

* 堺市モズ梅町4丁804

1930年、Coanda が噴出流と壁面および外圧によって成り立つところの「噴出流が側壁に付着する効果」を見出した。このようないわゆる「Coanda 効果」⁵⁾ を応用したのが今日の代表的な純流体論理素子である。図3は「Coanda 効果」の原理図である。パワノズルから噴射されたジェットが、まわりの空気をも吸い込みながら出て行くと考え。吸い込まれる空気がジェットのまわりから十分供給されているならば、ジェットは直進するであろうが、いま図のように一方に壁面があると、壁面側では壁面のない側に比べて空気の供給量が少なくなる。したがって、ジェットと壁面間は外気より負圧となり、圧力差によってジェットは曲げられ、壁面に付着する。その結果、図に示すような部分に渦が発生し、この低圧の渦が更にジェットの壁面への付着を安定化させることになる。この壁面付着の効果は約20年を経過してやっと純流体素子に応用されるようになった。

1959年 DOFL (Diamond Ordnance Fuse, Laboratories—現在 HDL (Harry Diamond Lab.)—で流体素子の基本形が発表されたが、⁵⁾ これが実用化への応用の最初であるといわれている。

3. 純流体増巾素子

3.1. ビーム偏向形増巾器 (Beam Deflection Amplifier)

この増巾器は HDL で開発された代表的なもので、主パワージェットのモーメントが制御ノズルを流れる制御流のもつモーメントによって、偏向されることを利用したものである。この素子のパターンを一例を図4に示す。いま左右両方何れの制御ダクトにも入力がないとすると、パワージェットはスプリッタによって左右同じ流量にわけられる。左右の制御入力に差があれば、すなわち入力が制御ダクトに加われば、制御ノズルを流れる制御ジェットによってパワージェットは偏向され、一方の出力が他方の出力よりも大きくなる。この場合パワージェット

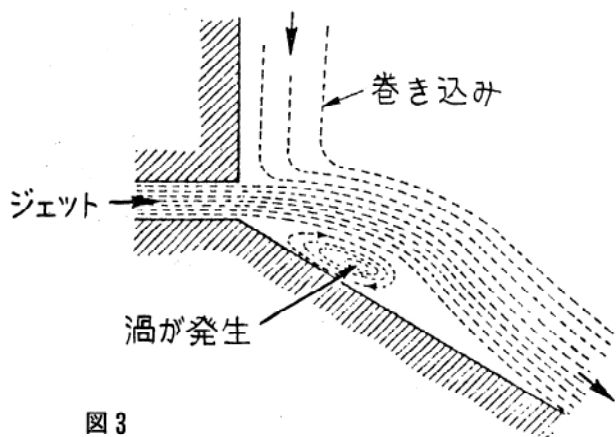


図3

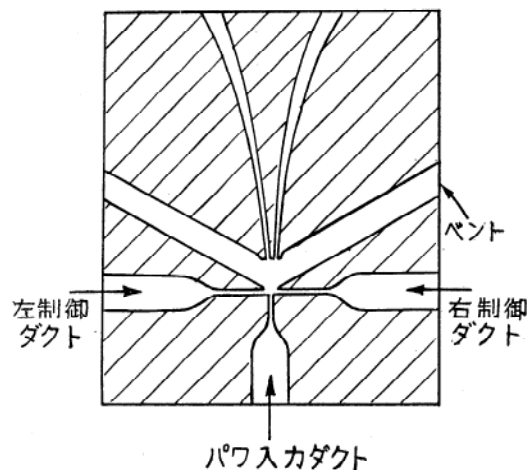


図4

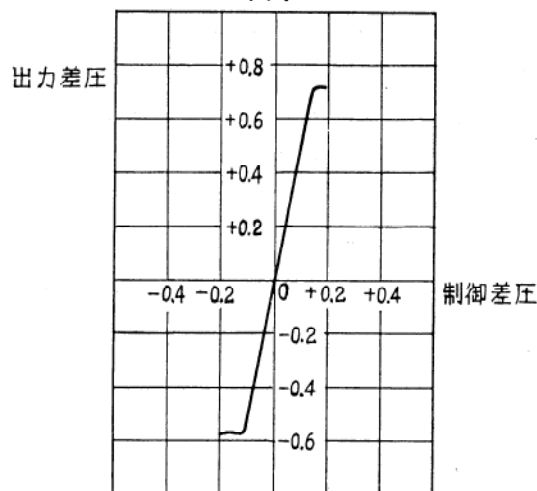


図5 比例特性を示す増巾器の一例 (正規化している)

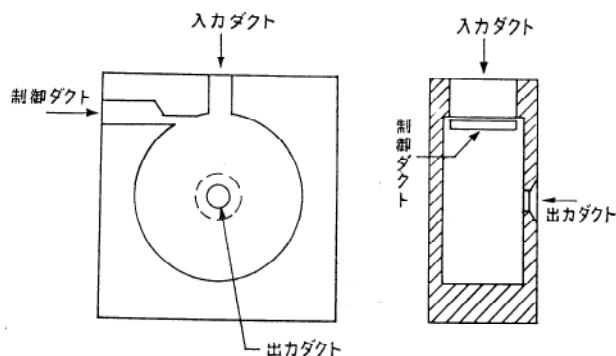


図6 渦流増巾器

と制御ジェットとが干渉する領域に空所を設けて壁効果を除去する必要がある。このようにすると図5のような比例特性が得られる。⁵⁾

3.2. 渦流増巾器 (Vortex Amplifier)

図6は3つのポート(流体の出入口)をもつ円筒室からなり、円筒室内の渦流の抵抗変化を利用して増巾作用を行わせるものである。比較的高いエネルギー(パワ)の流体ジェットが半径方向に円筒に入り中心で軸方向に出

る。いま制御流が制御ポートを通して接線方向に導入されると、それによってパワージェットの流れは円筒室内で渦巻形で回転しながら出力ポートに近づく。このときジェットは大きな加速度を受けるが円筒内を通過するとき圧力低下をおこし、増巾器を通る流量は減少する。したがってこの装置はパワージェットから見れば可変流抵抗器として働いていることになる。

この増巾器は流体抵抗が大巾に変化する特長があるが、入力から出力までの有効長さが長いために応答特性はあまりよくない。(15 cps で約 100° の位相おくれがあるといわれている¹⁾)

3.3. エルボ型増巾器 (DLEA)

これは Gianini Control Co. で開発されたもの⁶⁾ で、能動および受動の2ヶの管路(いずれも曲がり管路)よりなり、曲がり管路の流れのモーメントフラックスおよび2流体の干渉を応用したものである。

いま図7のような曲がり管路 (elbow) に流体を流した場合、流速分布は図の実線のようになるが、出口付近の制御ダクトから入力を加えると流体の流れは反対側に寄って出口で点線のようになる。つまり制御量によってモーメントフラックスが変わったことになる。

図7の原理を用い、これに能動管路、受動管路を設けたものがエルボ型増巾器で、これを DLEA (Double Leg Elbow Amplifier) とよんでいる (図8)。この増巾器は流量ゲイン (約220) およびパワゲイン (約37) が高い特長があるが、周波数特性があまり良くないこと

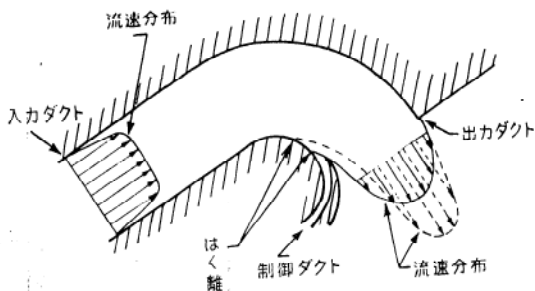


図7 曲がり管路 (elbow) の特性

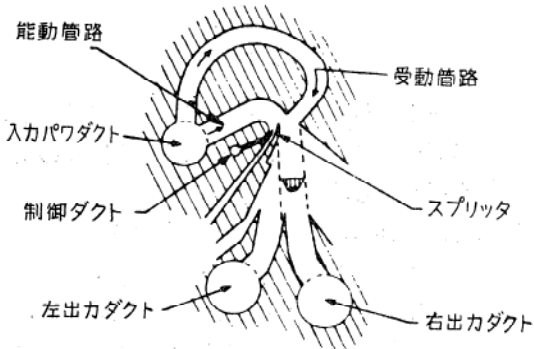


図8 DLEA 素子

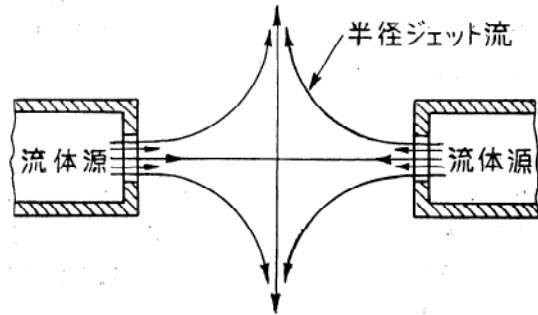


図9 流体ジェットの衝突

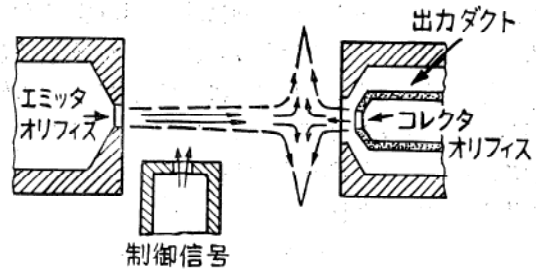


図10 TIM の構成

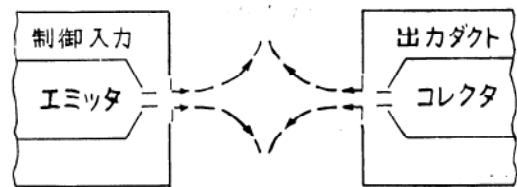


図11 DIM の構成

と (25 cps で 100° 以上の位相おくれ)、素子が複雑であるという欠点がある。

3.4. 衝撃モジュレータ (Impact Modulator)

図9に示すように対向する二つのノズルから噴出する流体ジェットが衝突すると、半径方向のジェットが形成される。この半径ジェット流の生ずる位置は、両方のジェットのモーメントの大きさによって決まる。衝撃モジュレータは半径ジェット流の生ずる位置を変えることによって一方のノズルの外側に設けたオリフィスより出力を取り出すようにしたものである。

図10. のように、エミッタ側のジェットを、そのノズルに直交するノズルからのジェットで偏向させて、半径ジェット流の位置を変える方式を横形衝撃モジュレータ (Transverse Impact Modulator—通称 TIM) とよぶ。図11のように入力によって流体ジェットの径をしばることにより、流体ジェットのモーメントフラックスを増加させて、半径ジェット流の位置を変える方式を縦形衝撃モジュレータ (Direct Impact Modulator — 通称 DIM) とよぶ。

衝撃モジュレータは制御側 (入力) インピーダンスを任意に高くとることができるので、幾つかの素子を結合させるのが容易である。DIM を二段連続に接続したと

きの圧力ゲインが8000程度になることが報告されている。¹⁾ この素子は真空管回路に相似性があるので、流体を用いた演算増巾器、加算器、積分器などを容易に構成することができる。

4. 純流体論理素子

4.1. 壁面付着型 (Wall Attachment Amplifier)

壁面付着効果すなわち Coanda 効果を、HDL で、はじめて流体論理素子に応用した。図12は、この素子のパターンで、パワージェットは左右の出力ダクトのうちいずれかに流れ、Coanda 効果により安定状態にある。いま右側の出力ダクトにジェットが流れているとき、制御入力を右のダクトから入れると、Coanda 効果がなくなって、パワージェットは直ちに左側の出力ダクトに移り、そこで安定状態を保つ。すなわち双安定状態 (bistable) 素子となる。

この素子のスイッチ速度は数 msec 程度である。

4.2. 境界層制御型 (Induction Amplifier)

図13. に示すように境界層制御を行って双安定のスイッチ作用を行なわせる素子を Honeywell 社が開発し、これを Induction Amplifier と名づけた。²⁾ いまパワージェットが入力ダクト O_2 から出力ダクトに流れているとする。制御ダクトより流体が流れていなければ、パワージェットの壁面側ははく離するが、このはく離は制御ダクトからの流入によって防ぐことができる。制御ダクト C_1 より流れ込む流体はパワージェットに接し、流体の粘

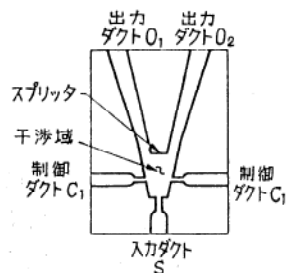


図12 壁面付着型素子

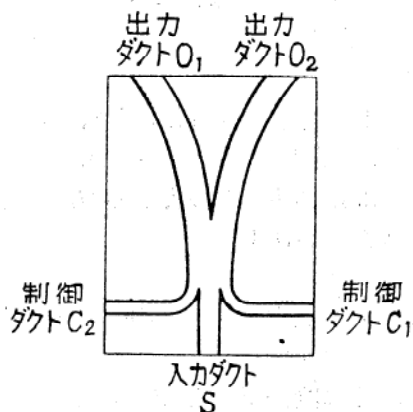


図13 境界層制御型素子

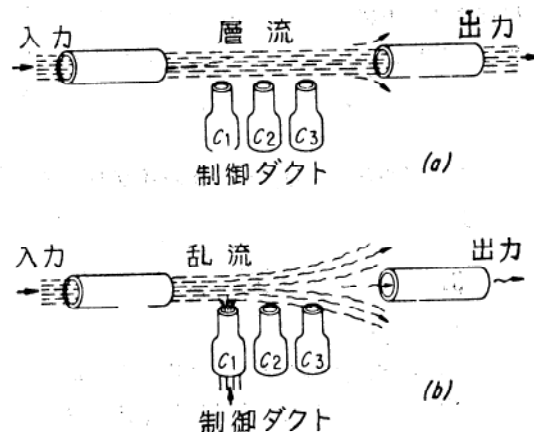


図14 乱流増巾器

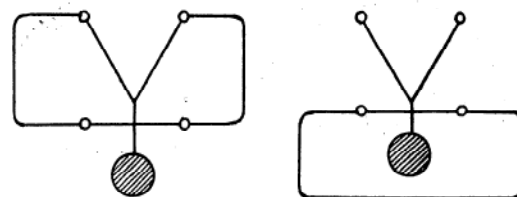
性作用によって連続した流れを形成し、パワージェットが O_2 の側に安定する。このパワージェットをスイッチさせるには、制御ダクト C_2 に入力を加える。制御流がパワージェットに接すると、流体の粘性によって直ちにパワージェットはスイッチしてダクト O_1 に至る。流量、圧力特性は壁面付着型のものによく似ている。

4.3. 乱流増巾器 (Turbulence Amplifier)

図14. に示すように同軸上に並べたパイプの一方からパワージェットを流し、他のパイプでこの流れを受けると、層流の場合には、ジェット流はほとんどすべて到達する。このジェットと直角の方向に制御ダクトを設けて制御ジェットを加えるとパワージェットは乱流となるから、出力ダクトに到達する流量は減少する。したがって極めて簡単に NOR 素子ができる。この増巾器は Auger 社で開発されたもので、³⁾ 構造簡単、多段接続の容易さなどの特長があるが、出力パワが小さく、応答速度が比較的遅い欠点がある。

5. マルチパイブレータ

デジタル回路に必要なマルチパイブレータ (パルスまたは矩形波発振器) は壁面付着型論理素子を用いて容易に実現できる。基本回路は図15に示す通りである。(a) は上記素子の出力の一部をフィードバックさせて発振させる。(b) は音響型発振器 (Sonic Oscillator) ともいい、上記素子の両制御ノズルをダクトで連結し、衝撃波が管



(a) フィードバック オッシレータ (b) ソニックオッシレータ

図15 マルチパイブレータの基本回路

内を伝播することによって自励発振させるものである。

(a)の場合発振周波数はフィードバック回路のインピーダンスによって変わり、(b)の場合はダクトの長さによって変わる。

正弦波発振器を作るには、マルチバイブレータの出力をフィルタに通して高周波分をカットすればよい。

6. 受動要素

6.1. 抵抗

流体インピーダンスが実数のみで圧力と流量との間に位相ずれがない場合である。多孔質栓やオリフィスを使う。

6.2. インダクタ

圧力降下が流量より 90° の位相が進んでいる特性をもつもので、細い径の長いチューブがこれに相当する。しかし多くの場合、流体インダクタンスは抵抗に比べて無視されている。

6.3. キャパシタ

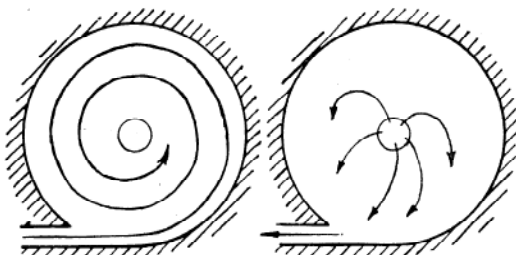
圧力降下が流量より 90° 位相がおくれるもので、タンクがこれに相当する。

6.4. 流体ダイオード

ある方向には流体インピーダンスが極めて大きく、それと反対の方向では小さいインピーダンスを持つもので、Teslaのダイオードがこの要素としては最初のものである。図16は渦流ダイオードである。中心ダクトから流体が入り接続ダクトから出るときはインピーダンスは低い。逆に流体が接続ダクトから入り中心ダクトから出るときは、流れは渦流となり中心ダクトまでの有効距離が長くなりインピーダンスが高くなる。⁷⁾ 図17は乱流ダイオードで、一線上に並んだ拡がり管と同径管との二本の管から成り立ち、拡がり管から入力を加えるときこの流れは乱流になり、同径管に至る量は少ない。これと反対の方向に流した場合は層流となるので流量は大きい。すなわち方向によってインピーダンスが変わり、ダイオードとして働く。

6.5. フィルタ

フルイディクスに用いるフィルタはふつう流体制御信号よりもはるかに高い周波数成分の外乱やノイズを除去



(a) 高抵抗 (b) 低抵抗

図16 渦流ダイオード

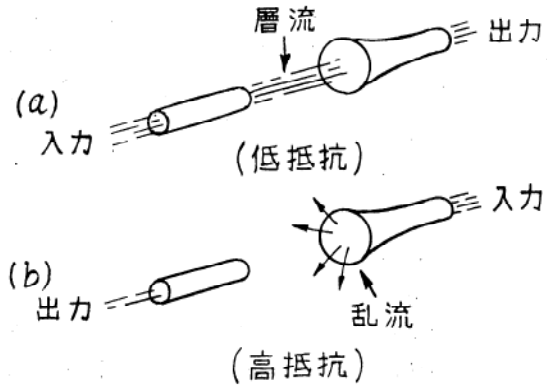


図17 乱流ダイオード

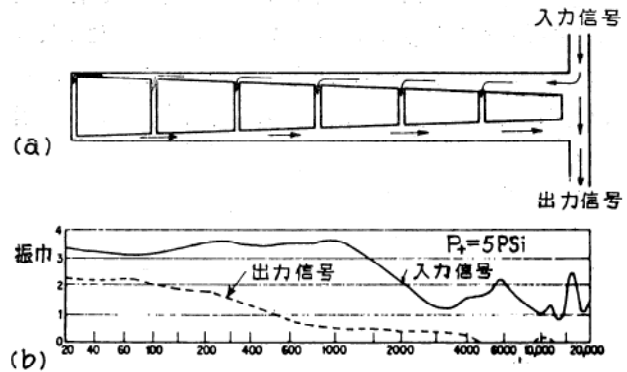


図18 フィルタ

したり、周波数弁別器として用いる。フィルタをうまく設計するには、システムの入出力インピーダンスをマッチングさせておく必要がある。図18(a)は Bowles Engineering 社で開発された Delay Line 型のフィルタ⁹⁾で、特性は同図(b)に示す。

7. 純流体制御素子の特長

7.1. 利点

1)信頼性：機械的な可動部分を用いないので、摩耗や機構の損傷による故障の可能性が少なく、寿命が長い。

2)環境条件：非常に広い範囲の温度条件下で安定に動作する（液体窒素を流体に用いたり、 1400°F で動作させた例がある。）従って電子回路などに必要な温度調節装置が不要である。また衝撃、振動、放射能などの影響を受けない。

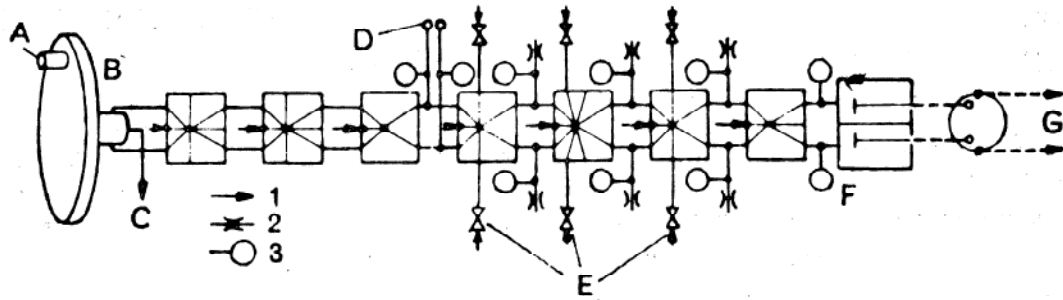
3)価格：小型軽量で、製作法の改善、量産化によって非常に安価に製作される可能性が多い。

4)電磁波によって機能に障害を受けない。また外部へ障害を及ぼすこともない。

7.2. 欠点

1)動作速度：電子機器と比べて応答がはるかに遅い。（流体の音速で制限をうける）

2)パワ消費：非動作時にも常にパワが失われる。（この欠点を少なくするには小型化と低圧化が望まれる。）



A : パワージェット入力
 B : レートセンサ
 C : ジェット出力
 D : トリムトランスジューサ
 E : ゼロ調整 (流体素子の)
 F : アクチュエータ
 G : エレベータへ
 →1. 流体流れ
 -X-2. 抵抗
 -O-3. キャパシタ

図19 航空機の姿勢制御系

3) 接続：ダクトやオリフィスの接続，更には増巾器の多段接続などが電子機器のように簡単ではない。

以上はよく知られた特長であるが，利点4)，欠点1)などは使用目的からいってさして重要でない場合が多い。

8. 純流体制御素子の応用

流体制御素子は開発途上であり，特にアメリカでは軍の要求で莫大な予算を投じて研究されつつあり，その軍用の応用例の詳細はわからないが，他の方面への応用もここ数年のうちには急速に開花するものと思われる。現在まで公表されているものも相当あるが^{1), 8)}，応用例の主なものを簡単に述べる。

8.1. 航空関係への応用

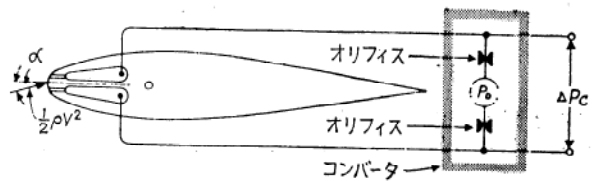
Honeywell 社では渦流形レートセンサを開発し，純流体の姿勢制御系を構成し，セスナ機に積んで実際に飛行したようである。⁹⁾ 図19では，センサ以外もすべて流体素子を用いていることがわかる。

この他流体素子のもつ長寿命，信頼性，放射能に耐えるなどの特長が買われて，人工衛星用救命ボートの制御用として研究されている。⁸⁾ また人工衛星の姿勢制御，航法あるいは誘導用計算機の素子として開発されつつある。

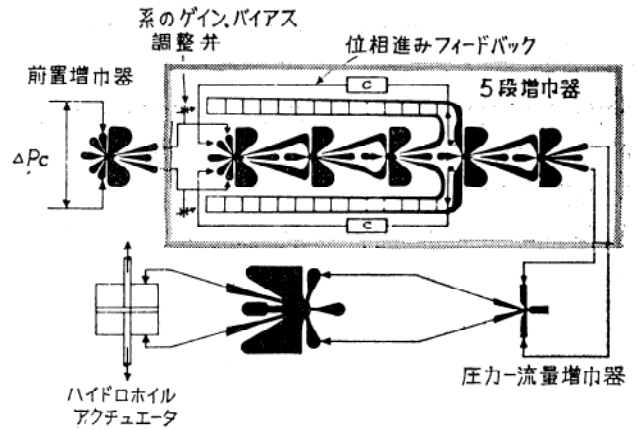
水中翼船のハイドロホイルの翼角度制御に純流体素子を応用した例が発表されている。この制御装置を用いると固定翼の場合よりも約35%も揚力が増加したようである。¹⁰⁾ 図20はハイドロホイル制御系回路を示したもので，翼の中心線に対して対称な位置にある2個の静圧孔の圧力差を入力として用いている。

8.2. 機械工業への応用

図21に示すタッピングマシンは Imperial Eastman 社が開発したもので⁶⁾ 以前の系では機械的なりミットスイッチで直接切換弁を制御していたが，その部分を純流体フリップフロップに置きかえ同図右のような系を構成し



(a) 検出系



(b) 流体制御要素

図20 ハイドロホイル揚力制御系

【もとの系】

【純流体系】

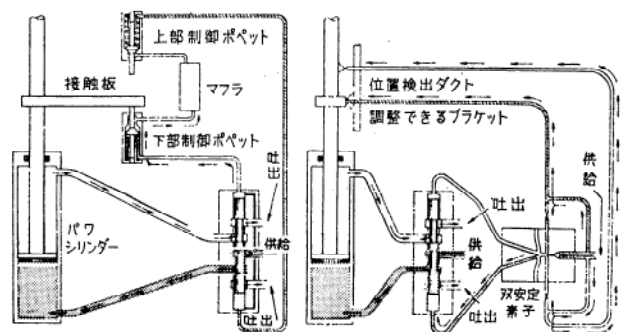


図21 タッピングマシン制御系

た。その結果8時間当りの作業能力が9,000個より27,000個と増加し，タップの寿命が200,000個の作業で10個使っただけであったと報告されている。

G.E. では、流体制御素子を用いてタービンの速度制御を行っている。⁸⁾

Auger 社では引火の危険性のある液体のピン詰め装置を開発した。¹⁾ この系では論理および増巾用として乱流増巾器が用いられている。

8.3. その他の応用

皮下注射の流通障害を検査するのに流体素子25個を用いて1時間に30,000本の選定をする機械¹¹⁾、記憶素子を用いて鋼球を毎分合いで60個の割分類する装置¹¹⁾など一般産業機器への流体制御素子の応用範囲が急速に拡大している。

この他人工心臓その他の医療機器への応用、ミサイルへの応用、空気調和への応用、原子力制御やマニピュレータへの応用などが活発に行われている。^{5),8)}

9. あとがき

フレイディクスに関するポテンシャルがあがり、流体制御を行う上で必要要素としてのセンサや変換器、更には試験機器の開発が進めば、将来益々フレイディクスの発展が期待される。更に現在のようなエレクトロニクス万能時代でも、機械工にとって半導体や (IC 集積回路) を用いるより空気と配管を用いることへの親しみ、現場で空気源が容易に得られるところなど、の条件が重なれば、設計指針、回路チェック等の方針、更には流体素子結合の際の困難さも、何れステップ・バイ・ステップに解決して行くことであろう。しかし、すべて流体素子に

置換することよりも、エレクトロニクスその他の制御方式、要素の特性などを考えて、それぞれの特長を活かすことが何よりも重要である。

文 献

- (1) Kompass "Perspective on Fluid Amplifiers" Control Engineering vol. 11, No. 9. 1964.
- (2) 尾崎・原:「純流体素子研究の現状と問題点」機械の研究18巻1号 P. 13 (1966)
- (3) 研野:「流体論理素子」自然 昭40.8月 P. 44.
- (4) 伊藤:「スプール弁流体論理素子の応用」機械の研究18巻4号 P. 507 (1966)
- (5) "Fluid Amplifier State of the Art. vol. 1" NASA CR-101 (1964)
- (6) Wood "Pure Fluid Device" Machine Design vol. 36. No.15. P. 153 (June 24. 1965)
- (7) Letham "Fluidic System Design-10. Miscellaneous Devices" Machine Design vol 38. No. 19. P.169 (Aug.18. 1966)
- (8) "Fluid Amplifier Application Studies" NASA CR-137 (1964)
- (9) "Guidance and Control with Fluids" Interavia May 1965. P. 676
- (10) "Pure Fluid Control for Hydrofoil Boat" Control vol. 8. No. 78 P. 655 (Dec. 1964)
- (11) "Fluid Amplifiers" Mechanical Engineering Jan. 1966. p.36

謝 辞

討論頂いた大阪府立大学中川憲治教授、ならびに大学院学生工藤允郎君に感謝したい。