

# 空気圧式変換器による計測・制御の 最近の動向

神戸大学工学部\* 米 持 政 忠

## 1. ま え が き

生産性向上に対する合理的計測・制御管理の要求に対して、機械、電気、光学および流体的変換器がその目的に応じて単独または併用され、その応用範囲も多方面にわたっているが、このうちとくに注目されるのは、流体方式による変換器のこの数年来の急速な目覚ましい発展ぶりであろう。

本来この変換器の利用面はその機能の点からみると、主にパワーを対象とする場合と信号の検出、伝達など情報処理を対象とする場合とに大別されるが、前者の場合には主として油圧を利用し、後者では空気圧を利用するが多い。

ここでは空気圧式変換器の応用部面をつぎの3部門、すなわち精密比較測長器、制御および計算機に分けて、それぞれの部門における最近の開発された技術面の状況について、展望を行い、参考に供したく思う。

## 2. 精密比較測長器の動向

変位の情報量を検出、拡大、指示するための基本的形態はいわゆる空気マイクロメータであって、今から約32年前に創案され、精密計測における新分野を開発したものであるとして注目されたものであるが、以来今日までこれを基にした考案がかなり多く試みられている<sup>1)</sup>。しかしその基本的原理は変わっていない。すなわち図1に示すように2個のしぼりを抵抗素子として直列に接続し、上流側の

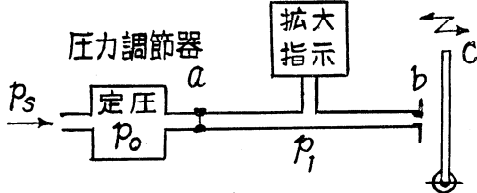


図1 偏位式計測（背圧式）

定抵抗しぼり  $a$  と下流側開放端をしぼり  $b$  とフラップ  $c$  によって可変抵抗しぼりを構成させ、フラップ  $c$  の変位の情報検出を2個のしぼり間における圧力変化によって行なう、いわゆる偏位式計測法である。この方式で精度を高めるための要件は圧力  $P_0$  を常に一定に維持することで、そのためには圧力調節器の技術的な開発が要求される。当初の状態では最も確実なものとして、これを水柱制御に依存した結果、圧力は水柱500~1000 mmの低圧におさえられて、その検出感度および動的追従性などがかなり拘束されたが、第2次大戦中のアメリカ工業界の大量生産と品質管理部面における切実なる要求が、これに対するより合理的な計測器の開発を必要とした結果、この方式の利用に注目して、まず圧力調節器をダイヤフラム、弁およびフィードバック制御による機械的調節器を開発して、高圧化、高性能化および構造の縮小化を計ったが、実際には、2~4 kg/cm<sup>2</sup>の圧力範囲内における変動圧に対して、これを正確に一定状態に維持するのはかなりの技術的調整を必要とする。

そのためこの圧力の変動による影響を相殺する方法として以上の偏位式に対し零位式計測法、すなわち差圧式が開発された。これは電気式計測におけるホイートストン・ブリッジ方式に等価な回路を構成して、精度の向上をはかったものである。図2はこの原理的回路構成

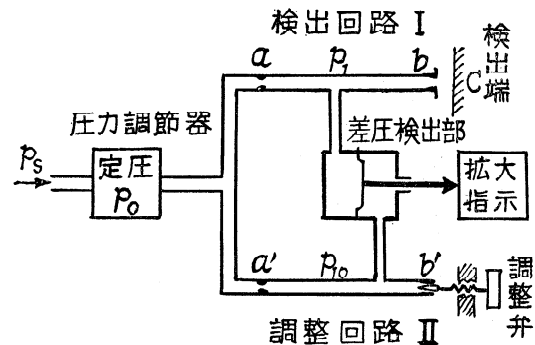


図2 零位式計測（差圧式）

\* 神戸市灘区六甲台町

で、検出側 I とこれと同様な回路の調整側 II とを並列に

設け、拡大、指示機構は隔膜により対向させた部分における差圧による偏差を検出するものである。現在この方式がもっとも実用化されている形態であり、とくに連続的な厚み、線径などの自動計測、一定形状の小物部品たとえば軸受のころ、球などの自動選別、さらに研削盤のような工作機械による加工に対する自動寸装置などにこの応用面がみられる。

以上のような圧力変化を利用する構成に対し、流量変化を利用する流量式空気マイクロメータも戦後開発普及され、前述方式とともに軸受および自動車工業などでの $1\mu$ 前後の寸法精度の検出に利用されている。原理的には図1の定抵抗しぼりを可変とするために、この機能をテーパ管とこの中に浮遊するフロートで行わせ、検出側の情報量に対応する流量変化をこのフロートの移動に変換指示させる。いわゆる面積式流量計の原理を利用したものである。

以上述べたことは、この方面に関心を有する者にとっては、何等こと新しいものではなく、すでにしばしば見聞されていることであろうが、実用面での信頼性のある計測器とするための要素的改良がじみながらもつづけられている。たとえば最近 Solex 社 で公表された圧力調節器の構成と、それによる高圧計測器の開発もこの1例とみてよいであろう。図3はこの回路構成であって、問

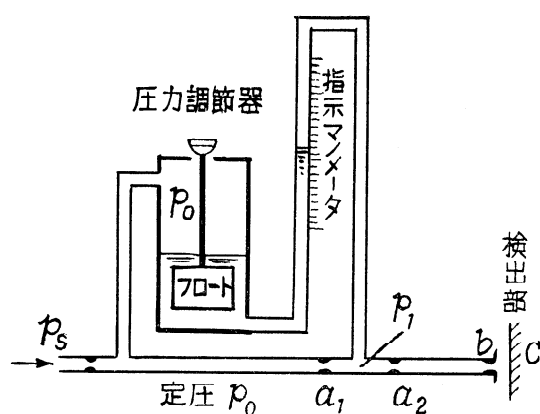


図3 高圧式の構成例 (Solex 式)

題となる圧力調節器を図示のごとくフロートとこれに直結した円錐弁とによって構成し、検出端の情報量による背圧変化 $p_1$ を指示するマノメータとの接続により常に $p_0$ を一定とするもので、これによって高圧化における精度向上および空気消費量を経済的におさえる方式である。

しかし以上とはまったく別な方式によるものとして最

近とくに注目される現象は、ジェット流を積極的に利用した流体増幅器の原理を計測器としても利用しようという試みである。その1例として dimensional gauging switch と称する高速追従性のよい計測器の原理的

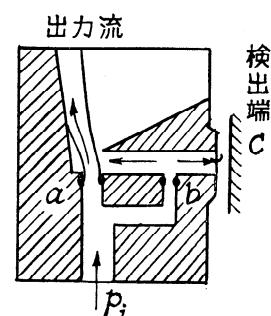


図4 高速計測スイッチ作用

構成を図4に示す。図で検出端 $c$ が閉じた状態を考えると、供給空気 $p_i$ はしぼり $a$ より主ジェット流として流出するが、その方向は側管におけるしぼり $b$ による制御流が主ジェット流に対し直角に噴出するため、これによって左側に偏向する。この偏向の程度は制御流の大きさに比例するから結局検出端のすきまの変化によっても変ることになる。これについての試作例によれば、その検出精度は従来のもものとほとんど変りはないが、検出速度は $0.03\text{ Sec}$ 程度でこれまでの最高速度より3倍程早く、今後この構成部分の合理的設計が確立されればかなりの向上が期待されると報告されている。この方式は量産用計測器としてのシグナルインジケータに相当するもので、検査部品の過大、合格、過小の選別に従来のような機械的な可動部を持たず流体本来の性質を利用した構成として今後の発展が期待されるものである。

### 3. 制御装置の動向

プロセス制御における空気圧式計装の利用は、歴史的にもきわめて古いもので、その主要構成は検出、調節、記録および操作の各部よりなっている。このうち検出部は前述空気マイクロメータと同一原理のノズル・ノズラップ方式が中心となり、調節部は回路のしぼり、容量を適当に組合せることにより、比例動作を基本として、これに積分、微分動作を付加した各種の構成がある。最近の傾向としてのグラフィック小型計装においては、一連の制御回路構成要素が統一空気圧として $0.2\sim 1.0\text{ kg/cm}^2$ の同一レベルの信号で接続されているので従来の大型調節計に比較して、被測定量の種類、容量のいかんに関せず同一の調節計が流用され、また調節計と計録計とはプラグインまたは簡単なねじ接続で容易に結合、分離してその取扱方法がきわめて簡単化されるなどの特色をもっている。<sup>2)</sup>

表 1 両方式の利用比較 %

| 分類 \ 年度 | 1959 | 1960 | 1961 | 1962 |
|---------|------|------|------|------|
| 電気式計装   | 3    | 18   | 20   | 21   |
| 空気圧式計装  | 97   | 82   | 80   | 79   |

最近の電気式制御装置の発展にともなう、両者の利用度の比較はしばしば話題になる点であるが、アメリカにおけるプロセス計装に対する1959より1962年までの調査結果によれば、表1に示すようにプロセス計装の約80%は依然として空気圧式計装に依存しているようである。また表2は空気圧式計装の工業部門別の利用割合を示す

表 2 空気圧式計装の応用 %

| 部門別 \ 年度 | 1959 | 1960 | 1961 | 1962 |
|----------|------|------|------|------|
| 石油工業     | 29   | 27   | 32   | 31   |
| 化学       | 42   | 44   | 41   | 41   |
| 鉄鋼       | 2    | 2    | 2    | 3    |
| 製紙       | 7    | 8    | 7    | 8    |
| 食品       | 2    | 1    | 3    | 3    |
| その他      | 18   | 18   | 15   | 14   |
| 計        | 100  | 100  | 100  | 100  |

もので、このうち石油および化学工業部門が全体の70~73%を占めていることはこの方式の特色をいかした利用面を示しているものと思われる。

以上のような制御方法とともに古い歴史をもつのが油圧による噴射管式制御装置でアスカヤ式として知られている方式である。この原理的構成は図5に示すように噴射管の方向を制御するのに機械的な動作信号で行ない、これによって操作部を駆動するものであるが、最近(とくに数年前から)にいたり、このような機械的な可動部を持たない流体の動作のみによる方法が開発され、これを流体増幅器と称して関心を集めている。この原理

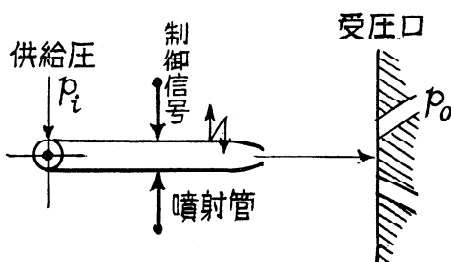


図 5 油圧噴射管式

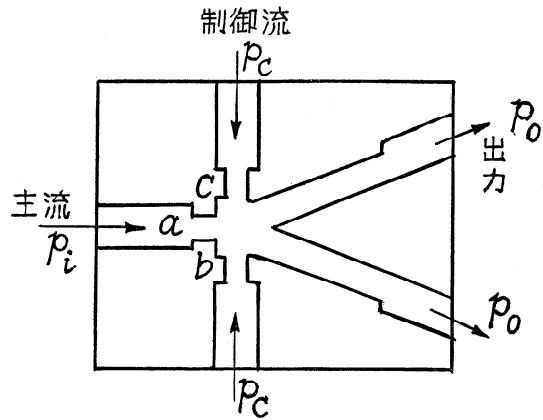


図 6 流体増幅器の基本的構成

は図6に示すように、主ジェット流に対し、動作信号も流体を用い、その直角方向に対向したしほり  $b$ 、 $c$  を設けて流出せしめ、両者の平衡圧力からの圧力信号の変化により、主ジェット流の方向を比例的に偏向させるもので、これによって従来のような摩擦その他機械的構成による外乱条件を防止し、構造の簡単さとともに、とくに空気を媒体として利用すれば油のように温度による粘性および体積弾性係数などの変化による影響が少なく、精度および速応性における効果がきわめて大きいものと期待されるものである。この特性はジェット流と受圧口の相対位置および圧力、通路の幾何学的構成によって変化する。その例を図7によって示すと、まづ図中(A)の

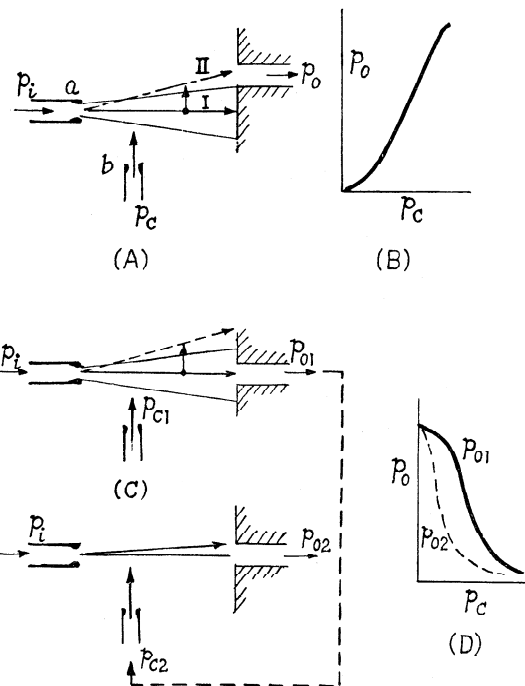


図 7 犠牲の傾向

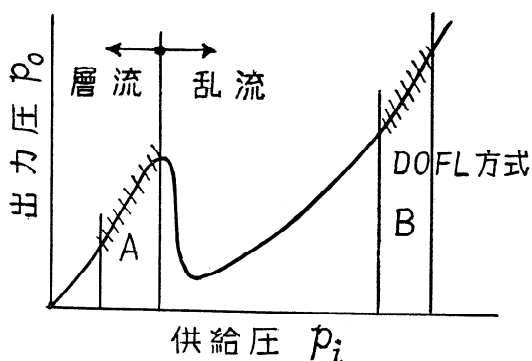


図 8 特性の利用範囲

御圧  $p_c$  が増加すると一定圧  $p_i$  のジェット流の方向が I から II に変化する。したがって制御圧  $p_c$  に対する出力圧  $p_o$  の特性曲線の傾向は (B) のように右上りとなる。また (C) のような構成で、同じく制御圧が増すと、その特性曲線の傾向は前のと逆で (D) のようになる。さらに (C) の構成を 2 個用い図中点線で示すように第 2 段では第 1 段の出力圧  $p_o$  を再び制御圧  $p_{c2}$  として同様な操作に関連させれば、その特性は (D) の点線で示すように急傾斜となり増幅度が増すことになる。またこの出力圧  $p_o$  の傾向は図 8 に示すように、層流から乱流に遷移するとき一時急激に低下し以後再び上昇する現象があるので、当初アメリカの DOFL (Diamond Ordnance Fuze Laboratories) で開発されたのは、図の右側の範囲 B を対象としたが、その後この現象の直前の範囲 A を利用して、小さな制御圧で比較的高い出力圧とパワー・ゲインを得る方法も検討されている<sup>4)</sup>。

この流体増幅器の特性に関してはいまだ多くの問題点がある。たとえば流れの方向が周壁の構造によって影響を受ける (wall 効果) 現象、特性の比例範囲を拡大するためのしぼりと回路の構成との関係、これらに関する理論的解析など現在検討中のものである<sup>5)</sup>。

これをプロセス制御装置としての今後の応用面を考えると、まづこの媒体はかならずしも空気に限定されないから、たとえば水または泥水、各種燃料、粉体および鉱石、石灰などの粒体類も対象にすることができる。またこの方式はその大きさの寸法的制限はなく、機能はその幾何学的形状によ

て支配されることなどの点から、それぞれの対象に適用した流れの精密な制御が可能となろう。さらに人工衛星、ロケットなどの誘導制御装置に対して、電気方式では問題となる高範囲の温度変化、電離層および放射能による影響などに対する 1 つの解決方法ともなる。同様に温度変化に敏感な油圧サーボ機構では困難な、高温度での機能をこれによって行なうための、hot gas servo としての試みも検討されている<sup>6)</sup>。

#### 4. 計算機器としての動向

空気圧を利用した演算方法のうちアナログ的手法としては、前述プロセス制御装置の比例、積分、微分動作など以前から用いられているが、最近の計算機に関する理論の発展にともない、これが制御装置の重要な要素として系に組入れられる状態において、これを電子計算機のみ依存せずに、空気圧方式によって従来のアナログ式からさらにデジタル式にまでその応用範囲を拡げつつあるのが最近の傾向である。このうちアナログ式として Airesearch 社で開発された APAC (Airesearch Pneumatic Analog Computer) は、小型でしかも独立した構

- 加減算
- $P_o = G_1 P_1 + G_2 P_2 - G_3 P_3$
- 加算  $P_3 = 0$
- $P_o = G_1 P_1 + G_2 P_2$
- 減算  $P_2 = 0$
- $P_o = G_1 P_1 - G_3 P_3$

ただし  $G_1 = l_1/l_o$ ,  $G_2 = l_2/l_o$ ,  $G_3 = l_3/l_o$

例 1. 加減算

$$P_o = C \frac{P_1 \cdot P_2}{P_3}$$

ただし  $C = \frac{l_1 \cdot P_3}{l_o \cdot P_2} = \text{Const.}$

例 2. 乗除算

$$p_o' = \frac{p_o}{1+TS}$$

$$= \frac{l_1 \cdot p_1}{l_o \cdot TS} = \frac{p_1}{KS}$$

ここに  $T = RC$

$$S = \frac{d}{dt}$$

$$K = \frac{l_o T}{l_1} = \frac{l_o RC}{l_1}$$

例 3. 積分演算

図 9 APAC の演算例 (ただし  $P_1, P_2, P_3$ : 入力信号  $P_o$ : 出力信号  $P_i$ : 供給圧 S.C.: シグナル カート)

成をもち、プロセス制御系に容易に挿入できるように前述統一信号圧の範囲でP, I, D動作のほか、加減乗除、自乗、開平などの関数発産器としての機能を行なうことができる。図9はその原理の例を示すもので、この基本的要素は、しぼりペローズ(シグナル・カート)と称している、てこおよびその接触位置を調整するためのサーボポジションナから構成されている。筆者の微、積分器の試作結果によれば、てこの支点、接触点などの機械的構成に留意すれば、動的特性およびその精度はかなりよいようである。

一方デジタル式としての空気圧式論理素子に対する対策としては、現在のところ構成回路中の可動部分の有無によって2つの方向に大別できる。このうち可動部分をもたない方式は前述の流体増幅器の利用で、たとえば図10に示すような方法で、blip blop, or nor および halbadder などの機能を行なわせることができる。これに対し可動部分をもつ方式は、General Psecisions Ke-arbot Diu で開発されたもので、その原理は図11に、示すように、円筒中の微小球(直径  $0.019 \pm 0.0002''$ )を可動体として敏速な切換操作を行なう。

この作用を簡単に述べると、円筒の両端にある空気流出端3, 4が開放した状態では球は円筒の上下端A, Bのいずれにあっても、その前後の力関係からつねに安定しているが、たとえばいま球がAの位置にあって、3にパルスが入り、この入口を閉じると、球上端の力が増し安定が破れて球はBに飛ぶ(同様にBにあるときに4を閉じればAに飛ぶ)。このときの速度は最高10マイクロsec

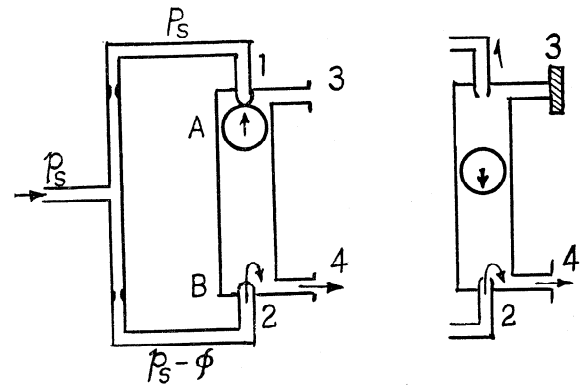


図11 ボール形論理素子

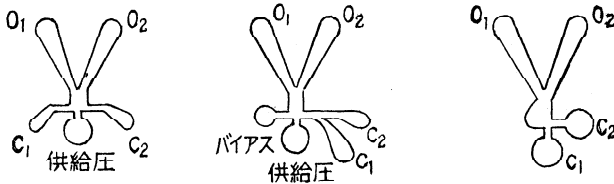
程度であると報告されている。この特色は供給圧、温度および装置内のもれなどをそれほど厳密に制御する必要がなく、またこれを電気的信号にも変換ができる。たとえばこの球の動きをコイルまたはこの円筒壁に埋込まれたキパスタ・プレートあるいは接点によって容易に行なわれる。また小型縮小化(一立方インチ中約3000ユニットの構成例もある)ができ、これによる計算機の消費電力は、同じ性能の電子計算機にほぼ等しいといわれている。

以上の論理素子の具体的構成も電気プリント配線の場合と同様な方法がとれる。すなわち材質は目的に応じて各種の高分子材料も利用でき、微小で複雑化した回路はそのパターンと光腐蝕法を利用して作る技術面の開発により、大量生産化とコストの低廉および熱発生素子がないことによる各素子の密接な構成が可能である。とくにこの回路で問題となるのは信号のタイミングと持続時間であるから、その伝播速度、切換速度、ユニット当りの出力密度、組立可能な最小通路と各素子の寸法などの点を考慮しなければならぬが、量的関係があまり重要性を持たないので、回路における固有の非線形性もあまり問題とならないことは注目すべき点であろう。

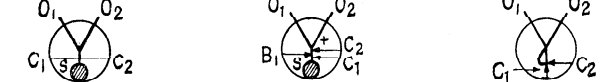
## 5. む す び

以上各部門別にこの変換器の最近の動向について概略的な紹介を試みたが、ここでとくに強調した点は、この数年来の新しい技術面の開発状況と、現在なお進展途上にあり多くの問題点を有するにもかかわらず、最近のエレクトロニクスによる計測制御の技術でも困難視される分野に対し、流体自体の本質的特色をいかした技術的解決法を与え

### ○ 構成



### ○ 記号



### ○ 作用

|                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | O <sub>1</sub> | O <sub>2</sub> |
| x              | o              | o              | x              |
| o              | o              | x              | o              |
| o              | x              | o              | o              |

ただし X: flow    o: no flow

Flip flop    OR ~ NOR    Half-adder

図10 論理機能

たことで、かかる意味から electronics に対比してこの部門を Pneumatics と称している向きもある。今後研究の進展に応じて、さらに新しい応用分野も開拓されるものと思う。

紙数の関係で説明不十分の部分については、下記引用文献を参照していただきたい。

#### 文 献

- 1) 杉本：計測と制御：1. 3/14. (1962).
- 2) 久保：制御工学：3. 305. (1959).
- 3) たとえば、Control Engineering, 10, 69, (1963).
- 4) E. J. Kompass : Coutrol Engineeriny, 10, 88/93, (1963).
- 5) F. T. Brown : Tvans. ASME, Series D, 86, 175/184, (1964).
- 6) たとえば Product Engineering, 17, 68/69, (1960).
- 7) D. W. Chapin ; ISA Journal, 8, 38/43, (1961)
- 8) W. E. Gray & H. Stern ; Control Engineering, 2, 57/64, (1964).
- 9) H. E. Riordan : Instr. & Contr. Systems, 43, 1260/1261, (1961).