

〔 連 載 〕

流量計測の歴史 第14回

< 差圧式流量計 >

小川 胖
Yutaka Ogawa

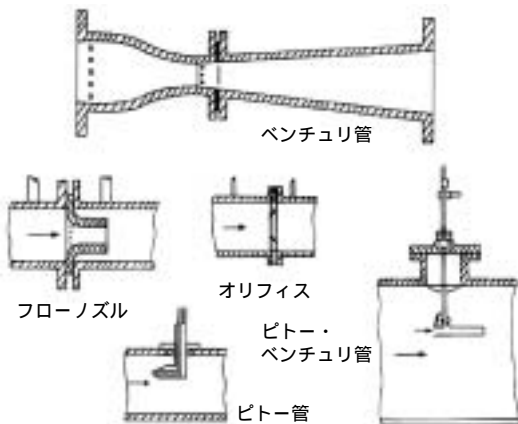
今まで羅列的に流量計の歴史を述べてきていたが前号の「水道メータとガスメータ」のごとく、これからは流量計の種類によって歴史をひもといた方がまとめやすいので第2弾として差圧式流量計の歴史について述べることにしたい。

1. 20世紀になってからの差圧式流量計の急速な発達

20世紀になって急速に発達したのは、各種差圧式流量計である(第1図参照)。しかしその初期においては十分な精度の指示・記録あるいは積分装置がなかったため、あまりよい評価は得られなかった。ところが、このことが逆に圧力-機械変換装置の発達を促すことになる。20世紀前半の流量計の発達の方向についてメドロック(R. S. Medlock)⁽²⁾は次のような項目をあげている。

- ① 受信計装の発達
- ② 角縁オリフィスの発達

ベンチュリ「メートル」の構造

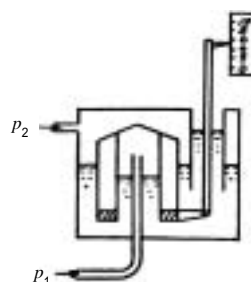


第1図 各種差圧式流量計
(出典：香月久「水量メートル」〔昭和14年〕より)

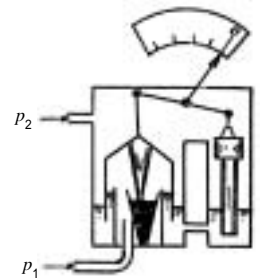
- ③ 基本的流体機器の改良
- ④ 流体利用技術の発達
- ⑤ 流体力学の理論の進歩
- ⑥ 標準化
- (1) 受信計装の発達

19世紀の末、ヴェンチュリー管式が広く実用されるようになると、その基礎的原理である差圧の測定装置もいろいろと改良された。しかし、その初期においてはほとんどがU字型水銀柱管式で、しかも記録装置を駆動する出力を得るために、大きなスピンドルと鑄鉄製のフロートをを用いていた(流量計測の歴史<12>・20世紀初頭の天然ガスの計測<第4図参照>)。また差圧が小さい場合は水柱管式によった。ガス流量が測られるようになったとき、オイルシールのベル型圧力バランス(日本では沈鐘式圧力計と呼ばれたもの)も開発された。さらに数年後には、同じ差動原理のリングバランスも開発される。環状天秤式圧力計と呼ばれたものである(文献⁽³⁾)によれば、原理は多分第2図及び第3図によるものと思われる。

しかし解決しなければならなかった大きな問題は、平方根を引き出す技術であった。さまざまな技法、例えばカムやリンク機構を指示あるいは記録装置に組み込むなどが行われた。



第2図 沈鐘式圧力計⁽³⁾



第3図 環状天秤式圧力計⁽³⁾

積分装置について言えば、直線性の保持機構が問題であり、複雑なカムやリンク機構を組み合わせた装置を駆動するためには、強力で正確な時計装置が必要となり、写真1に示すように、なんと60kgもの錘が用いられたりしていた。高精度化の要求は色々と独創的な発明を生み出したが、結局は加減算・乗除算及び開閉のできる機械式計算機となったが、これを組立てるには複雑かつ熟練した技術が必要とされた。また水銀を大量に使用していたので、水銀汚染の問題が生じていたが、1907年にダイヤフラム及びペロウズの発明により、ドライフローメータの開発によってこの問題も解決した。

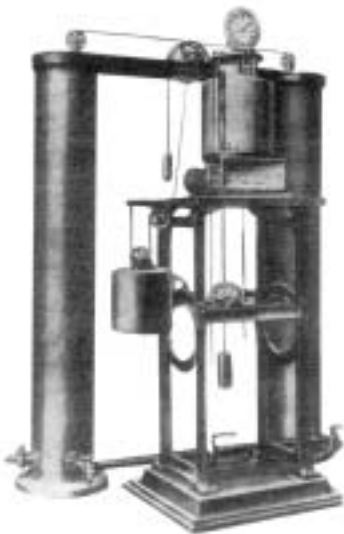


写真1 初期の積分装置¹⁾

(2) 伝送と記録

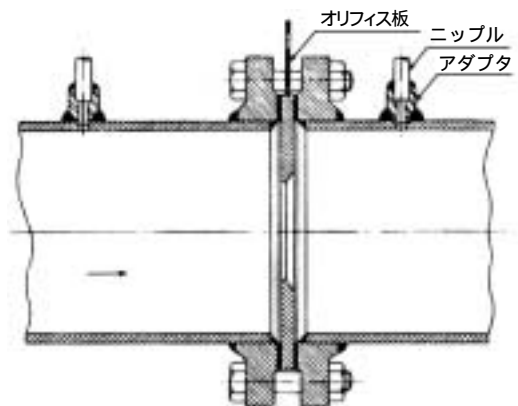
水道設備でヴェンチュリ管を使う場合に、ポンプ場あるいは貯水池から管理室まで信号を送らなければならなかったが、1910年頃にはポテンショメータ式あるいは抵抗式の伝送器が実用化されていた。1920年代の面白い開発の一つに音声伝送器があり、これはフロートの位置を読取る人の声を音管で録音盤に入れ、その音声を電話で送る方式である。1900年前半はこうした機械的受信計装技術が着々と進んだ時代でやがて来る電子技術を受入れる基盤を用意したと言える。

(3) オリフィス式の発達

オリフィスの原理が理解され始めたのは17世紀中頃になってからであるが、最初の特許はマックス・ゲールに認可されたものだそうである。それは上流側、下流側とも角を丸めた縁を持つもので、流体の通過量は1850年頃のナビエより導かれた公式によって算出され

た。しかしこの角をとった縁のオリフィスは制度的に不満足なものであったため、ゲールは苦心してこれを改良し1909年にサルコメータの名で知られる実用の蒸気流量計を開発したが、これは彼の大きな業績とされている。その次に来るのが大容量の天然ガスの測定に鋭角で方形の縁の板状オリフィスを使ったウエイマウス(Thomas R. Weymouth)の実験で、圧力タップはオリフィスの上流、下流とも1インチのものであったが、その後アメリカの標準となった。ウエイマウスについては流量計測の歴史<12・20世紀初頭の天然ガスの計測>でも記述しているので参照されたい。1913年にヒックシュタイン(E. O. Hickstein)は圧力タップを上流側2.5×管径、下流側8×管径に適用したデータを公表した。1916年にはジャド(Horace Judd)がヴェナ・コントラクタ・タップの適用を提唱し、初めて偏心・切欠き形のオリフィスに言及している。

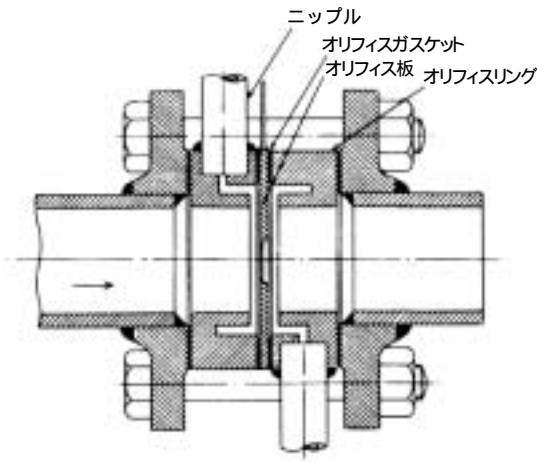
ヴェナ・コントラクタ・タップの流量係数データはASMEによって1935年に完成され発行された。この間英国ではホジソンがゲールの業績に刺激されて、1909年に今日使用されているようなDとD/2の組合せタップを持つP型方形縁の薄板オリフィスを開発した。このオリフィスには下流側に45度の面取りがしてあった。第4図に現在のD、D/2タップオリフィスを示す。



第4図 現在のD、D/2タップオリフィス⁶⁾

ホジソンはさらに1909年から24年にかけて多くのオリフィスを開発し色々な口径比及び広範囲レイノルズ数に対する流量係数曲線を設定している。

こうした中、ドイツでは圧力タップをオリフィスの上下流の面から直接取り出すコーナタップを開発し、使用した。第5図は現在使用されているコーナタップである。



第5図 現在のコーナタップオリフィス⁽⁵⁾

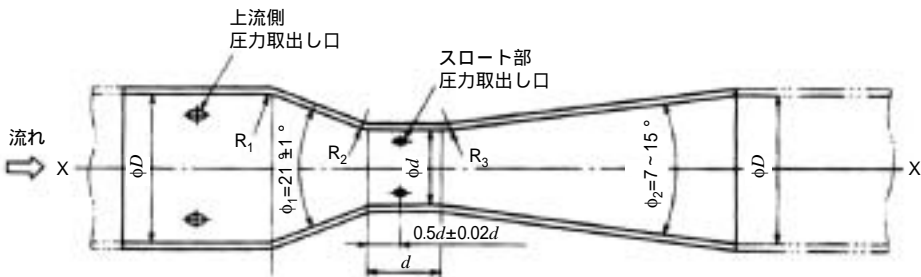
(4) 基本的流体機器の開発

ハーシェルはヴェンチュリー管を開発したとき、上流側に長いテーパ管は必要ないのではないかと考えていたようである。それを商品で実証したのもホジソンで、1912年に設計した「オリヴェント」においてこれを明らかにし、小型化とコストダウンに貢献した。

第6図に現在の標準型の円錐型ヴェンチュリー管を示す。

流量測定用のノズルは1847年のフローデに遡る。彼は水中を引張る板にかかる摩擦に関する実験でヒントを得たということである。そして1928年頃にはフローノズルは差圧式の中で主要な位置を占めるようになり、1930年ドイツでは、短い形のフローノズルの流量係数に関する研究に着手した。日本では、主としてドイツ規格DINによるものを用いている。アメリカでもこれをISAで採用している。第7図は現在採用されているフローノズルの寸法図である。

工場では動力および処理工程で蒸気の使用量が増加してきたため、積算装置を含めた小型蒸気メータが必要となってきた。そこでホジソンは1923年に第8図に



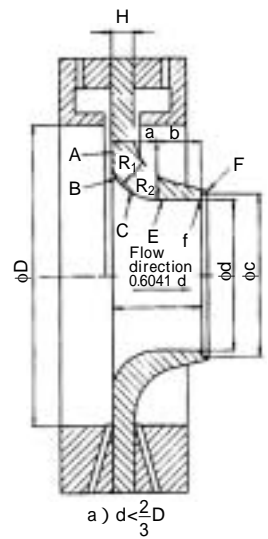
第6図 現在の円錐型ヴェンチュリー管⁽⁵⁾

示すように本流にオリフィスを用い、分流に羽根車を用いたシャント型メータを開発した。

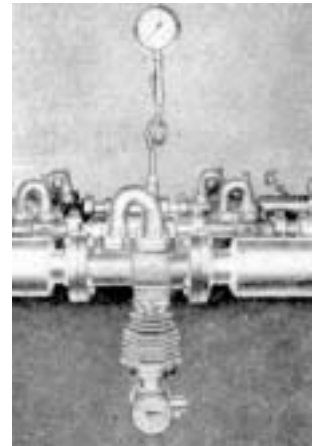
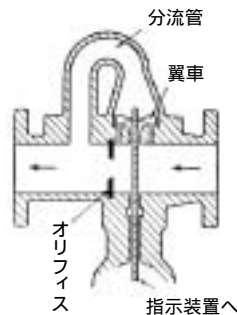
このメータの原理はオリフィス前後の差圧によって、分流管に流れが生じて翼車を回転させる。羽根車の回転が取り出されて、右の写真に見られるようなカウンターで蒸気量が計測されるものである。

またこの時期を通じて技術者や研究者を悩ませた問題に脈動流の計測があった。ホジソンはこれにも徹底した研究を行ってホジソン数というものを導入している。

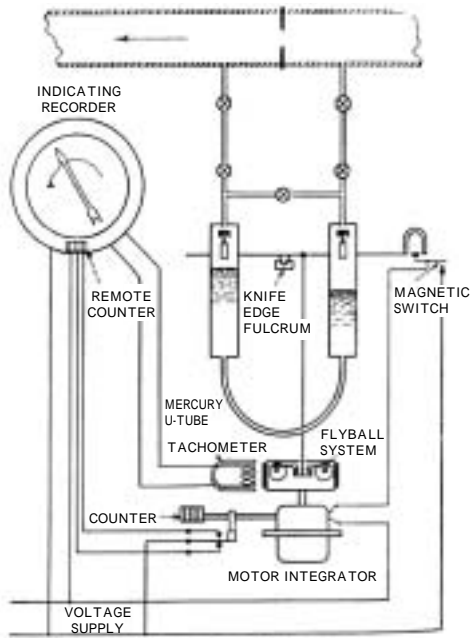
ホジソン数は流量測定系の脈動を減衰させるために必要なバッファ・タンクの大きさを推算するために考えられたものである。



第7図 現在のフローノズル⁽⁵⁾



第8図 ホジソンが開発した現在のシャント型メータ⁽⁶⁾



第9図 サーボ操作型ゼロ方式機械 - 電気系流量計

2. プロセス制御の芽生え

1937年にアメリカのスミス (ED S. Smith) が ASME で「工業計器、その理論と応用⁽⁷⁾」という題でプロセス制御について詳しく述べている。この中では今日確立されている自動制御理論から始まり、温度制御、圧力制御への応用例が示されている。

第9図はオリフィスによる流量計測に当時応用された「サーボ操作型ゼロ方式機械 - 電気系」と称されるシステムである。この作動原理はパイプ中のオリフィスの両側に発生する差圧によって、図に示すようにUチューブの左右に入る水銀の量がアンバランスになる。するとUチューブの中心のナイフエッジに対し反時計方向に回転しようとする。すると電磁スイッチが働き電流が流れサーボモータを回しそれと連係しているフライボールの回転によって発生する遠心力によってバランスを保つようになる。流量が大きくなればなるほどUチューブの傾きが大きくなるので電磁スイッチの働く回数が増え、サーボモータの回転数が増える仕組みになっている。タコメータはフライボールの回転に対する微分装置で瞬間指示計となるが、一方ヘッドと流量の間および遠心力と回転速度の間には、実質的に二次関数関係が存在するので、カウンターは流れの総量を示す積算計となる。さらにこの装置は流量と総量の両方を受信器に伝送するものであった。

3. 差圧式流量計の原理

差圧式流量計は現在でも各工場におけるプロセスにおいて最も多く使用されている流量計である。ここで簡単に差圧式流量計の原理をレビューしてみよう。

第10図にオリフィス板上に上流から流体が流れてきたときの圧力分布図を示す。

今オリフィスの寸法を図のように取り、上流側断面 a における流体の密度を ρ_1 、圧力を P_1 、下流側断面 b における圧力を P_2 とすると、オリフィスを流れる流体の質量流量 Q_m は

$$Q_m = \epsilon C \frac{\pi/4 \cdot d^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{2/\rho_1(P_1 - P_2)} \quad \dots(1)$$

と表せる。

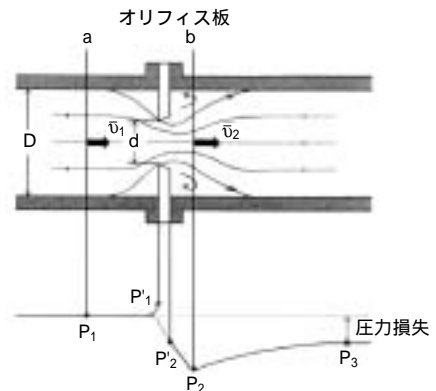
ここで

β : 絞り口径比 = d/D

C : 流出係数

ϵ : 膨張補正係数

(1)式はオリフィス板、ヴェンチュリー管、及びフローノズルに普遍的に使用でき、差圧流量計の種類によって係数 C 、 ϵ が変わるだけである。



第10図 オリフィス板前後の圧力分布

<参考文献>

- (1) 小泉袈裟勝, 「流体のスペシャリストたちへ、過去からのメッセージ - 流量計の開発過程におけるエピソード - 」, オーバルSpecialty, No.4, 1989.1
- (2) R. S. Medlock "The historical development of flow metering" Brown Boveri Kent Plc.
- (3) 辰田 正, 「圧力の測定と測定器の取扱に就いて」, 科学と工業, 第1巻, 6号, 1925
- (4) L. K. Spink "Principle and Practice of Flow Meter Engineering" The Foxboro Co.
- (5) 「流量計測 A to Z」, 日本計量機器工業連合会編
- (6) 松代正三, 「改定 流量」, コロナ社
- (7) ED S. Smith, JR., et al "Industrial Instrument, Their Theory and Application" Transaction of ASME, 1937