

別刷

# 計測と制御

Vol. 47 No. 4 2008

流量測定技術における技術継承

小宮 勤一



社団法人 計測自動制御学会

# 術継承

小宮 勤一\*

\*E-mail: komiyak@coral.ocn.ne.jp

キーワード：差圧流量計 (differential pressure type flowmeter), オリフィス板 (orifice plate), 流出係数 (discharge coefficient), 国際規格 (international standard), 日本工業規格 (Japanese industrial standard).  
JL0004/08/4704-0276 ©2008 SICE

## 1. 流量測定法，流量計の変遷

最初に過去半世紀ほどの間に流量計測技術がどのように変わってきたかを概観してみる。1960年頃までに使われていた流量計の多くは、それまでに長い歴史をもっている機械式の流量計で、鉛直に取り付けたテーパ管の中にフロートをおいて、それに働く流体力と重力の平衡状態から流量を測定する面積流量計，ガスメータに代表されるように、一定容積の容器に流体の流入，充満，排出の繰り返しを行い，その頻度から流量を求める容積流量計，流体力学のベルヌーイの法則を利用した絞り機構に発生する差圧から流量を計算する差圧流量計，羽根車，あるいはタービンの回転角速度が平均流速に比例する性質を利用した翼車流量計と呼ばれる流量計などであった。

その後1960年代に入って流体の流れの中では超音波の伝播時間が流速の影響を受ける性質を利用して平均流速を求める超音波流量計，ファラデーの電磁誘導の法則を利用した電磁流量計が実用化され，少し遅れて渦発生体から生じるカルマン渦列の渦剥離周波数が流速にほぼ比例する性質を利用した渦流量計が実用化された。

これらの流量計の測定原理はほとんど流速の測定原理に基づいていることから測定された流量は体積流量なので，測定の目的によっては質量流量を求めるために密度の測定が必要になる。そこで質量流量の関数である量を直接検出する方式のいろいろの質量流量測定法が提案されたのもこの頃である。

このような測定原理の多様化とともに，測定量の検出にも多くの変化が見られた。一例を挙げると，差圧式流量計の場合の測定量である差圧は液柱式のマノメータで検出し，その液頭の変位を変位変換器で測定する，などの方法がとられていた。その後，差圧を空気圧力に変換する力平衡式の差圧変換器，電圧，電流に変換する電磁式の差圧変換器が全盛を極めた。さらにシリコンダイヤフラムと半導体のストレンゲージを組み合わせた差圧変換器が使われ，今ではMEMS (micro electro mechanical system) 技術によって製作された小型の差圧変換器が用いられている。

過去50年ほどの間に新しい原理による測定法の開発，新しい信号変換方式の採用，信号変換器の開発などによって流量計の信頼性，流量測定の確度ともに向上した。上述の測定方式の流量計はそれぞれその特徴を生かして流量測定

に貢献している。

機械式の流量計の1つである絞り機構による流量測定方法は，流量測定方式の中でも長い歴史をもつ流量計の1つであり，また使用されている数も他の流量計に比べてきわめて多いことが知られている。その理由は構造が比較的簡単であること，決められた形状に機械加工し，決められた方法に従って測定を行えば，流量計の校正を行わなくても測定の不確かさを求めることができるという優れた長所をもっている点に由来するといえるであろう。

反面，測定の不確かさが他の流量測定法に比べて比較的に大きい，検出部を含めた測定部の配管が長く必要である，等の欠点も挙げられているが，少なくともここしばらくの間はこの原理に基づく流量計の数の上での優位性は動かないものと考えられる。歴史のあるこの測定方法もこの50年ほどの間にいくつかの変遷があったので，その経過を少し詳しく見てみることにする。

## 2. 絞り機構による流量測定方法の変遷

### 2.1 測定の原理

円形の断面をもつ管路に絞りを挿入し，そこを流れる流体にベルヌーイの定理を適用するとこの管路を流れる流体の流量は次式で表わされる。

$$q_m = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \sqrt{2\rho_1(p_1-p_2)} \quad (1)$$

ここで  $q_m$  は質量流量， $d$  は絞り部の最小直径， $C, \varepsilon$  はそれぞれ流出係数，気体の膨張補正係数（液体の場合は1.0）と呼ばれる実験係数， $\beta$  は絞り径と管径の比で絞り径比と呼ばれる量， $\rho_1$  は絞りの上流側の流体の密度， $p_1, p_2$  は絞りの上流側，下流側に設けられた圧力取り出し口の位置の圧力を表わす。この式からわかるように2つの実験係数が求められていれば，絞り径，圧力差の測定から質量流量を計算することができる。

この原理を用いた流量測定に関する最初の報告は非常に古く1800年代の後半に発表されている<sup>1)</sup>。その後，おもにアメリカとドイツのいくつかの大学，研究所において多数の実験が行われ<sup>2), 3)</sup>，それらの結果から信頼度の高い実験係数が求められた。この数値を使うことによって上に述べた，「流量の校正をしなくて測定の不確かさが求められる」という特徴が生まれてくる。これらはドイツ，イギリス，ア

メリカなどにおいて国内の工業規格、あるいは学会の編集のハンドブック<sup>4)~6)</sup>としてまとめられている<sup>7)</sup>。

絞り機構の形状は大別すると、オリフィス板、ノズル、ベンチュリ管の3種類になり、同じ形状の絞り機構でも圧力の取り出し方法の違いによって特性は異なってくる。また、絞り機構の取り付け、その前後の配管条件など細かい条件が必要であるが、本稿では細部を説明するのが目的ではないと考えるので、おもにオリフィス板の流出係数の変遷を取り上げ、その後で測定に関係するいくつかの項目について補足的に若干の説明を加えることにする。

## 2.2 1960年ごろの日本の状況

1950年代に出版されている流体力学の教科書の測定に係る箇所や、流量測定技術全書<sup>8)</sup>などを見ると、ドイツ工業規格 DIN-1952 の第6版 (1948)<sup>4)</sup> が引用されていて、その中には流量係数 (DIN では流量係数  $\alpha$  が用いられていて、流出係数  $C$  との関係は  $\alpha = C/(1 - \beta^4)^{1/2}$  である。) が絞り径比をパラメータとしたレイノルズ数の関数としてグラフで与えられている。液体の流量測定であれば ( $\varepsilon$  は 1.0 であるから)、レイノルズ数が決まり、絞り径比  $\beta$  がわかれば差圧の測定値から (1) 式によって流量を計算できることがわかる。

さて、この流出係数  $C$  とレイノルズ数の関係はどのようにして求めるのであろうか。それには流量値がはっきりしている、 $\varepsilon = 1.0$  と考えられる流体の流れに挿入したオリフィス板前後の差圧を測定すればよい。管径、流量、流体の粘度などを変えてレイノルズ数の広い範囲の実験を行い、また流量校正装置の偏りを除くために何箇所かの校正装置で行った測定が必要になる。1930年代にドイツで行われた数多くのこのような実験が報告されている。その1つが参考文献の2)であり<sup>(注1)</sup>、これによると1910年ごろから使われていた絞り流量計の再実験を行い、管径、流量、流体の種類を変え、数箇所の測定の結果をまとめて実験係数を求めている。これは文献4)の古い版に当たるドイツ国内規格の作成のために信頼度の高い実験係数を定めることを目的としていた<sup>9)</sup>。また、他にイギリスでも同様な実験が行われているし<sup>10)</sup>、当時、ISA (国際標準化機構 ISO の前身で、International Federation of Standardizing Associations 万国規格統一協会) で国際的な規格作成の準備がされていたようである<sup>11)</sup>。

上に述べたヨーロッパで行われた実験とは別個にアメリ

カにおいて同様な研究が進められていて<sup>(注1)</sup>、その実験結果を使った流量の測定装置がわが国でも使われるようになった。ここで取り上げているオリフィス板についていえば、形状はヨーロッパのそれと同じであるが、差圧を取り出す位置が違っている。ヨーロッパの方法はオリフィス板の直前直後の圧力差を検出するコーナタップという方式であるが、アメリカではオリフィス板の前後から1インチの位置から取り出すフランジタップ方式のほか、ヴェナコントラクタータップ、パイプタップなどと呼ばれる圧力取り出し方法が採用されている。

コーナタップ方式では流れと圧力取出し口の位置を管径が違っても幾何学的に相似になるように考えた構造であり、流出係数は絞り径比とレイノルズ数の関数になる。これに対して、フランジタップ方式などではパラメータとしてさらに管径が加わることになる。実用面を強調するとこのような構造が考えられたのであろう。当時、アメリカの石油精製、石油化学プラントなどと一緒にプラント計装技術がわが国に入ってきて、アメリカの流量測定方式が使われたものと考えられる。

このように差圧の取り出し位置が違えば (1) 式の実験係数も異なってくるのは当然で、ヨーロッパとは別個の実験が行われ<sup>2)</sup>、これらの結果はアメリカ機械学会 (ASME) のハンドブックとしてまとめられている (参考文献5)の1959年版、第5版)。この中では流量係数は数表で与えられていて、この計算には ASME とアメリカガス協会 (AGA) のオリフィス板流出係数の委員会によって作成された実験式を用いて計算していることが述べられている。この実験式はフランジタップ方式のオリフィス板の流量係数の実験式で、レイノルズ数の関数として表わされ Buckingham の式<sup>(注2)</sup>とよばれることがある。このように当時はヨーロッパの規格と、アメリカの規格がそれぞれ独立に用いられている状況であった。

## 2.3 最初の国際規格と日本工業規格

1960年代の後半に絞り機構による流量測定方法の国際規格が始めて提案され、採択されている<sup>12), 13)</sup>。絞り機構としてオリフィス板、ノズルの規格が最初に作成され、ついで1年ほど遅れて、ベンチュリ管の規格が作られた。オリフィス板についていえば、ドイツの規格に採用されているコーナタップ方式の圧力取り出し方法と、ASME のヴェナコントラクタータップ、フランジタップ方式が採用されている。流量係数  $\alpha$  はコーナタップに関しては DIN のグラフによる表示から数表による表示に変わり、他のタップについては ASME に採用されている実験式による表示が使われている。

(注2) オリフィス板の流出係数の実験式に付けられた固有の名称はその発表者の名前によっている。これらの変遷を述べたが、形は年代とともに複雑になってきている。基本的に流出係数はレイノルズ数、上流側タップまでの長さ、下流側圧力タップまでの長さ、絞り径比がパラメータになっているのはいずれも同様である。

(注1) 1930年代にアメリカおよびドイツで行われた実験の中心であったのが OSU (オハイオ州立大学) の Prof. S. R. Beitler, VDI の Dr. R. Witte の2人で、この名前は絞り機構、特にオリフィス板の議論ではしばしば登場する名前である。前にも述べたようにこの2人の実験結果が現在の絞り流量計の基礎になっていることは間違いない。流出係数の実験式の決定にもそのデータが話題にされたようであるけれども、Beitler の測定の実データは現在も残っているが、Witte の実データは残っていないようである。Witte の流出係数の値としては DIN に記載されているグラフから読み取った値を使用せざるをえないとのことである<sup>10)</sup>。

この国際規格を見る限りアメリカとドイツの規格を2つ並べて採用した感じが強いが、前にも述べたようにこの規格の間にはまったく異なった実験と表示方法が使われているので、1つにまとめるのは簡単ではないことは容易に予想され、専門家集団の努力があったことを知ることができる<sup>10), 14)</sup>。この2つの国際規格を基にして「絞り機構による流量測定方法」のJISが制定された<sup>15), 16)</sup>。

その後、絞り機構による流量測定法の国際規格は何度か改定されている。オリフィス板についていえば、1930年代のデータを再評価し、コーナタップ、フランジタップ、D-1/2 Dタップ方式についてオリフィス板の流出係数を1つの式にまとめる試みがあり、Stoltzの式<sup>(注2)</sup>と呼ばれる実験式が公表された<sup>17), 18)</sup>。この式を採用して1980年にISO規格の改定があり<sup>19)</sup>、さらに1991年にも改定され<sup>20)</sup>、オリフィス板の流出係数の適用範囲がレイノルズ数について無限大まで拡張された。この国際規格の改定に伴ってJISも改定されている<sup>21), 22)</sup>。

## 2.4 現状

1980年代の後半に、それ以前の10年の間に測定されたオリフィス板の流出係数のデータを集め新しい実験式の作成を目的としてアメリカ、ヨーロッパ合同の会議が開かれ、国際規格の改定が始まった。この結果採用されたのが、Reader-Harris/Gallagherの式<sup>(注2)</sup>と呼ばれる実験式で<sup>23), 24)</sup>、基本的に複数のタップに適用できる点では上記のStoltzの式と同様であるが、実験式としてはより複雑な形になっている。

改定されたISO規格は一般の事項、オリフィス板、ノズル、ベンチュリ管の4部に分かれ、内容もより詳しくなっている(ISO規格<sup>25)</sup>)。これに伴ってJISも改定された(JIS<sup>26)</sup>)。この変遷の概略を図で示してみると図1のようになる(文

献34)の図8.2.2を参考にし新しい事項を追加した)。

## 2.5 流出係数以外の条件の変遷

オリフィス板の流出係数について国際規格の中でどのように変遷を遂げてきたかを少し詳しく述べてみた。オリフィス板を使って流量を測定するためには、このほかにも重要な事項がいくつかあり、それらについても、流出係数と同じように、たくさんの実験が報告されている。その1つは(1)式の中のもう1つの実験係数、気体の膨張補正係数 $\epsilon$ で、実験式も新しい実験結果によって改められている。

絞り機構に発生する差圧は管路内の流速分布によって変わってくる。したがって、流出係数は管路内の流速分布がある定まった条件下で測定し、測定の際もこの条件を満たす流れであることが必要になる。ここで決められている流出係数は管路内の流速分布が十分に発達した乱流状態の分布であるという前提で、すなわち十分に長い直管の後にオリフィス板を挿入した場合の流れで測定している。したがってこの流出係数を使って流量を測定するには、オリフィス板を十分に発達した流速分布状態の流れに設置しなければならない。流量測定に際してその都度管内の流速分布を測定するのは実際的ではないので、発生差圧が完全に発達した乱流状態のそれと変わらないような上流側の直管の形状と直管の長さを決めて、これよりも長い管路の下流にあれば流出係数をそのまま使用してさしつかえないというように規定している。この条件は実用的には非常に大切で、オリフィス板の設置の際に考慮しなくてはならない重要な問題であり、規格の版が新しくなるにしたがって適用できる配管形状の種類が多くなって使いやすくなってきている。

また上記の条件を満たすことができない場合に、絞り機構の上流側に挿入して流速分布を完全に発達した乱流のそ

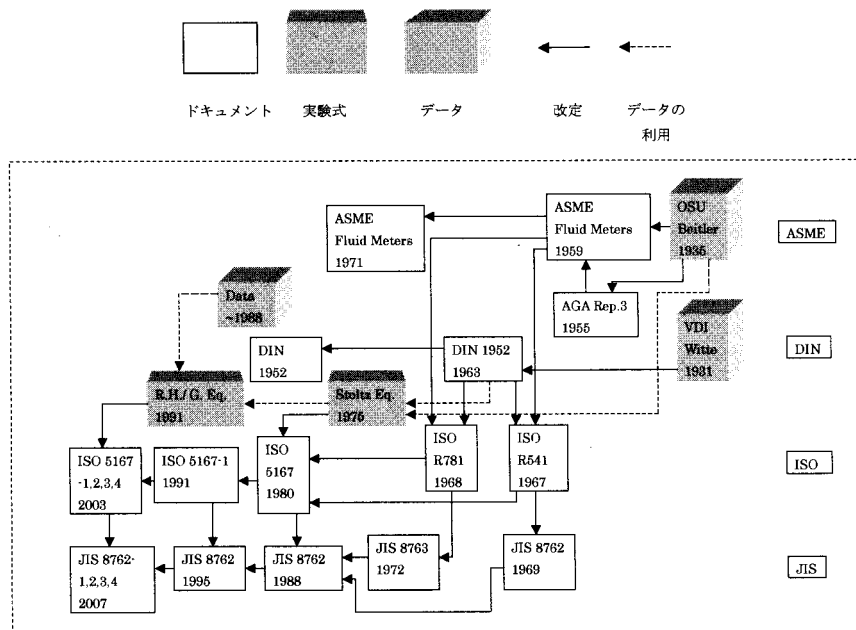


図1 規格の変遷

れに近づける整流装置の研究も行われ、その構造、形状がいくつか提案されている<sup>27)</sup>。この整流装置は流量測定立場からだけでなく、管路内の流れの問題としても関心は大きい。

今までおもにオリフィス板について述べてきたが、このほかの絞り機構であるノズル、ベンチュリ管などについてもオリフィス板と同じように形状、実験係数、設置条件が規定されている。

### 3. 関連する研究報告

#### 3.1 絞り流量計についての研究報告

絞り機構を利用した流量測定方法についてその変遷を述べたが、結果として規格の変遷を述べた感が強い。これは絞り機構による流量測定法のエッセンスともいべき内容であり、これ以外にも絞り流量計に関係する研究は非常に数多く、ここで筆者が引用したのはほんの一部にすぎない。1930年代のドイツの文献 (VDI など)、アメリカの ASME の文献などを調べると孫引きで多数の文献を見つけることができる。また、1960年前後のアメリカ、イギリス、ドイツの機械関係の学会誌には、当時行われた絞り流量計の実験に関する報告が多数掲載されている。

今までに述べた標準化された絞り機構のほかにもいろいろな形状の絞り機構が提案されている。そのうちのいくつかを紹介してみよう。液体に気体が混入したり気体に固体が混入しているような、いわゆる混相流の測定には、オリフィス板の上流側に気体や固体が留まってしまうので使用することができない。これに対応するために管路のある方向の管壁部に障害物がなく気体や固形物がたまらないようにした形状のオリフィス板、すなわち円形の孔の一部を欠いた欠円オリフィス、円形の孔が偏心して管路壁に接している偏心オリフィスが提案されている<sup>5)</sup>。このような混相流体の測定は厳密に (1) 式が適用できるかどうか確かではないが、実用的には利用される機会の多い研究であろう。

一般の絞り機構は測定条件の1つにレイノルズ数の範囲が決められている。管径が小さい、測定流体の粘度が大きい、流速が小さいなどの理由で規定のレイノルズ数以下の流れの流量測定が必要な場合がある。四分円ノズルと呼ばれる絞り機構など、このような条件に適した形状の絞り機構が提案されている。この中で興味を引くのは標準のオリフィス板の流入流出面を逆にして使用する方法で、低レイノルズ数用の絞り機構としての提案であるが、オリフィス板の取り付けを間違ってしまった場合にこの実験係数が用いられ、実用的には (あまり使用されないにもかかわらず) 重宝がられているようである<sup>6)</sup>。

絞り機構を挿入することによって管路の圧力損失が起こるが、この大きさはできるだけ小さいことが望ましい。このような目的の研究報告もあって、Dull Flow Tube<sup>28)</sup>、Lo-Loss Tube<sup>29)</sup> などという名称の絞り機構の報告もある。

管路を圧縮性流体が流れているときに、挿入された絞り

機構の前後の圧力の比 (絶対圧の比) がある大きさ以下になると絞り機構から噴出する流体の質量流量は一定になる。この状態をチョーク状態と称し、気体の流量測定分野では一定流量の発生装置、あるいは流量の標準として使われている。この状態では絞り部の流速が音速になっていることからこの絞り機構を音速ノズルと呼ぶことがある。この研究も最近盛んに行われていて、気体流量測定の国際規格としてまとめられている<sup>30)</sup>。

ISO には上に取り上げた規格のほかに、TR (Technical Note) としてまとめられた何点かの出版物がある。これはいわばガイドブック的な性格をもっていて、実際に絞り機構を使って流量測定をする際に実施面での教科書ということができよう<sup>31)</sup>。

#### 3.2 現状の問題点と将来の方向

絞り機構を使って流量測定を行う場合には規格に記載されている形状の絞り機構を使用し、規格に従った測定を行うのが最も信頼度の高い測定ができることになる。上に述べたように現在の規格は何回か改定された結果、以前よりも含まれる情報量は多くなり使いやすくなってきている。その一方で以前には強調されていたと考える、実験を尊重するという姿勢が若干弱くなっているのではないかと感じる<sup>(注3)</sup>。たとえば、オリフィス板の流出係数の表において数値の補間は許されるが補外は行ってはならないと記されている。しかし現在の ISO 規格では流出係数がレイノルズ数の無限大まで示されているのは、使用範囲がここまで広げられたと考えられるが、どこまで実験が行われているのか不明である。さらに流出係数の不確かさについて考えると、不確かさは実験データがあって初めて評価される性質の量なので、実験が行われていない範囲をどのように評価しているのか不明であり (産総研・高本氏の指摘)、将来検討が必要になるのではないだろうか。

絞り流量測定 ISO は将来とも改定が続けられると考えられるが、絞り機構の上流側の必要な直管長の問題、あまり取り上げられていないノズル、ベンチュリ管について流出係数の確認のための新しい実験、などが必要になるであろう。

規格の中に述べられている流れの条件は定常流れであるが、実用的には差圧の時間平均に対する変動分の rms 値が 0.10 以下である場合に定常流とみなしてさしつかえないとしている。変動流の測定は実用的には大切な問題で、その基本となる脈動流の測定は昔から研究の対象であったにもかかわらず<sup>32)</sup>、現在でも解決がついていないわけではなく、絞り機構による流量測定の中でも残された興味のある問題の1つであろう。また実験の手法として、流れの可視化、CFD を取り入れた測定手法などが実用化されているので、

(注3) たとえば、気体の膨張補正係数  $\epsilon$  は  $p_2/p_1$  が 1 と 0.75 の範囲で決められているが、この理由は ISO が圧力比 0.75 未満という条件の実験データの信頼度が低いと考えているためであるとの指摘がある<sup>32)</sup>。

絞り機構による測定の発展にこれらの実験方法が寄与するのではないだろうか。いずれの問題の解決も大掛かりなプロジェクトになるし、測定の信頼度を向上する点からも国際的な協力の下に行われる必要があると考えるが、これらに積極的に参加することが望まれる。

謝辞：本稿をまとめるにあたって多くの方々から資料や文献を拝借したり、流量測定について教えていただいたり、ご意見をお聞きした。とくに、横河電機の山本隆男氏、東京メータの池内弘道氏、産総研の高本正樹氏、バンテックの小川胖氏、ガス機器検査協会の渡辺紀之氏、北海道大学名誉教授の高田誠二氏にお礼を申し上げる。

(2007年10月1日受付)

#### 参考文献

- 1) C. Herschel: The Venturi water meter: An instrument making use of a new method of gauging water; Application to the cases of very large tubes, and of a small value only, of the liquid to be gauged, Transactions of American Society of Civil Engineers, 17, 228/258 (1988)
- 2) たとえば, R. Witte: Durchflußbeiwerte der IG-Messmündungen für Wasser, Öl, Dampf und Gas, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 72-42, 1493/1502 (1928)
- 3) たとえば, H.S. Bean, E. Buckingham and P.S. Murphy: Discharge Coefficients of Square-edged Orifice for Measuring the Flow of Air, Journal Research, NBS, 2, p.561, March (1929)  
S.R. Beitler and P. Bucher: The Flow of Fluids Through Orifices in Six-Inch Pipes, Trans. ASME, HYD-52-7a, 7789 (1929)
- 4) DIN-1952: VDI-Durchflußmessregeln, 6 Aufgabe, Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen, Blenden, und Venturidüsen (1948)
- 5) Fluid Meters, their theory and applications, ASME (1971)
- 6) B.S. 1042: Part 1: Methods for the Measurement of Fluid Flow in Pipes, Part 1: Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes, British Standard Institution (1964)
- 7) E. Ower and R.C. Pankhurst: The Measurement of Air Flow, 6th Edition, p.160, Pergamon Press (1977)
- 8) たとえば, 小林梯一郎: 流量測定ならびに自動調節 (実用工業計測器全書 3), コロナ社 (1949)
- 9) R. Witte: Neuere Mengenströmmessungen zur Normung von Düsen und Blenden, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 5-5, 205/211 (1934)
- 10) R.E. Sprenkle: The thin-plate orifice for flow measurement, Flow measurement in closed conduits, paper B-1, 1-127, Edinburgh (1962)
- 11) R. Witte: Internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Durchflußmessung, Brennstoff Wärme und Kraft, 7-7, 295/300 (1955)
- 12) ISO / Recommendation R 541-1967: Measurement of fluid flow by means of orifice plates and nozzles
- 13) ISO / Recommendation R 781-1968: Measurement of fluid flow by means of Venturi tubes  
ISO / Recommendation R 781-1968 Appendix: Measurement of fluid flow by means of Venturi tubes, Classical Venturi tubes used out side the scope covered by ISO Recommendation R781
- 14) 文献 11)
- 15) JIS Z 8762-1969: 絞り機構による流量測定方法
- 16) JIS Z 8763-1972: ベンチュリ管による流量測定方法
- 17) R. W. Miller: The Stoltz and ASME-AGA Orifice Equations Compared To Laboratory Data, Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering, 101, 493/490 (1979)
- 18) J. Stoltz: A Universal Equation for the Calculation of Discharge Coefficients of Orifice Plates, Flow Measurement of Fluid, 519/534 (1978)
- 19) ISO 5167-1980: Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full
- 20) ISO 5167-1-1991: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices-Part 1: Orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full
- 21) JIS Z 8762-1984: 絞り機構による流量測定方法
- 22) JIS Z 8762-1995: 絞り機構による流量測定方法
- 23) M.J. Reader-Harris and J.A. Sattary: The orifice plate discharge coefficient equation, Flow measurement and Instrumentation, 1, 67/76 (1990)
- 24) M.J. Reader-Harris and J.A. Sattary: The orifice plate discharge coefficient equation-the Equation for ISO 5167-1, In Proc. of 14th North Sea flow measurement Workshop, Peebles, Scotland, East Kilbride, Glasgow, National Engineering Laboratory, p.24, October (1996)
- 25) ISO 5167-1-2003: Measurement of fluid flow by means of pressure difference devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part 1: general principles and requirements, -Part 2 Orifice plates, -Part 3 Nozzles and Venturi nozzles, -Part 4 Venturi tubes
- 26) JIS Z 8762-1, 2, 3, 4, 絞り機構による流量測定方法 (2007)
- 27) たとえば, K. Akashi, H. Watanabe and K. Koga: Development on New Rectifier for Shortening Upstream Straight Pipe length of Flow meter, Proceedings of IMEKO symposium on Flow measurement and Control in Industry, 12b-5, 279/284 (1979.11)
- 28) I. O. Miner, et al.: The Dall Flow Tube, Trans. ASME, 78-4, p.475 (1956)
- 29) L. T. Hopper: Design and Calibration of the Lo-Loss Tube, Trans. ASME, Ser D, 84, p.461 (1962)
- 30) ISO-9300-2003: Measurement of Gas Flow by means of Critical Venturi Nozzles
- 31) たとえば, J.L. Hodgson: The Laws of Similarity for Orifice and Nozzle Flows, Trans. ASME, 51, 303/332 (1929)
- 32) 文献 7) の p.172
- 33) たとえば, ISO/TR 3313: Measurement of pulsating fluid flow in a pipe by means of orifice plates, nozzles or Venturi tubes (1992)
- 34) 竹中俊夫 (編): 絞り機構の設計マニュアル, 日本規格協会 (1991)

#### [著者紹介]

小宮 勤 一 君 (正会員, フェロー)



1954年東京大学工学部卒業。(株)鳥津製作所、工業技術院計量研究所に勤務。その後九州工業大学工学部教授、工学院大学教授を務めた。工学博士。本会フェロー。流体量、特に流量、流速の測定、プロセストモグラフィなどに関心をもつ。応用物理学会、計量史学会などの会員。