

## 流量計測に科学を—II

武田 靖 古市 紀之

現状の流量計測には原理的に科学が欠けていることを述べた。そこでは多くの不便を解消できず、取られている処置はどれもが弥縫策に見えて仕方がない。それだけでも、そのパラダイムを打ち破る必要がある。

流量計測は全ての工学的プロセスの基盤技術であり、だからこそ、その上位のあるいは下流のあらゆるプロセスの基礎技術である。他方では実験観測を基礎とする理学研究においてさえもエビデンスの定量評価に必要な基礎技術でもある。その様な意味合いから、全ての理工学的活動の将来に向けて必ずや解決が必要であろう項目について 立ち入って述べてみたい。

### ☆ 誤差あるいは精度の問題

流量計測の科学的な定義は計測装置内部での実流の流速分布の配管内の面積分(二重積分)である。現在使われている超音波流量計は流れに乗った音波の移動を利用してその平均速度を求めているから、その一部は満たしているとも言える。しかし面積分を求めることにはなっていない。多測線を使う方法は 1973 年に米国 Westinghouse 社が特許<sup>1)</sup>を受けた方法であるが、正しい形で離散化展開されているわけではない。しかも実現可能な多側線はせいぜい 4-6 本の側線程度であり、誤差を議論できる程度とは言い難い。配管内流速分布の UVP を使った研究<sup>2)</sup>では、層流で 1%以下の誤差を実現するためには測定点を 18 点、乱流でははるかに多い測定点が必要であると調べられている。

このように現状では、測定装置内部での流体の挙動を正しく把握されていない以上、測定の誤差や装置の精度などを科学的に検討すること

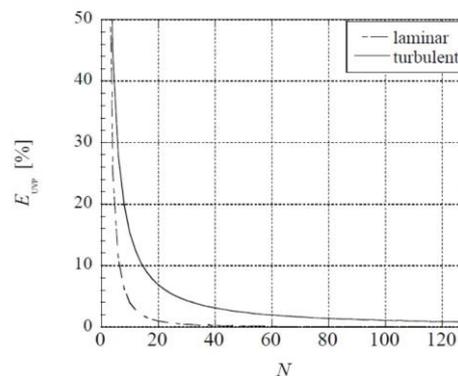


図1 測定点数で誤差がどのように変化するかを調べた結果. 数値計算と実験の比較. 層流と乱流.

は行い難く、従来の型式認定といった方法を変更する所まではほど遠いと言わざるを得ない。

### ☆ 精度表記の問題

流量計を使い始めた時(1970 年代後半)に驚いたのは、精度表現がフルスケール FS 精度が大部分でリーディング RD 精度がほとんど使われていないことであった。FS 精度とは、その機器の測定範囲の最大値に対してどの位の確かさを表すものである。例えばその最大範囲が 100 である機器の FS 精度が 2%ということは、その機器が観測した値にかかわらず精度が最大測定範囲 (FS) の  $2\% = 2$  単位である。つまり表示値が 80 であっても 20 であってもその精度は 2 なのである。その場合、読み値に対しては  $80 \pm 2 \rightarrow 2.5\%$ 、あるいは  $20 \pm 2 \rightarrow 10\%$  という事になる。このことは、測定法あるいはその流量計独自の精度表現であり、他の機器(温度計や圧力計など)と整合した観測値の合算評価ができないことになる。それに対して読み値 RD 精度とは、そのままの意味で、読み取られた測定値に対して何%ということに対応している。この読み値精度は、一般的な測定に際しての真値に対する不確かさという観点から、きちんと統計処理された観測値を表す表現として一般化している。

少々の説明をしよう。観測値としては決して真値を得られているわけではない。現象自身の揺らぎや測定器自身の変動、測定ノイズなどがあり、未知の真値に対して必ず揺らぎがある。そこで複数回の観測を行ってその測定値を統計処理して、その分布の中心(平均値  $s$ )を最も確からしい値と認定して、その値からどの程度離れていても真値と見做せるかを表現することにしたものである。そのため、その正しさの程度(平均操作で得られる標準偏差値  $h$ )を「不確かさ」として、その範囲 $[s-h, s+h]$ に真値が入る確率が 68%以上であるという意味なのである。そのように一般的な物理量を定量観測した場合のデータの処理方法は確立していて、RD 精度を使うことが一般化している。

最近の流量計測機器では RD 精度で仕様に表記されているものも多く出回るようになったが、まだ一般的ではない。

流量計測自身は近代科学が発生するよりはるか以前からあるから、歴史的な経緯があるのであろうが、なぜ FS 精度が一般的に使われてきたのかは筆者には明らかではない。おそらく「精度」という表現よりも「不確かさ」という方がより科学的な根拠で定義されてはっきりしているにもかかわらず、未だに「精度」が使われ続けていることと理由は同根であろう。しかし流れ現象自身が非線形で複雑であり、時間変数と空間変数の分離が困難であることに起因して、結局測定場の把握ができず、その変動量を直接捕捉することができなかったことが大元の理由と推察することができるだろう。

あるいは原理的に、流量計測における原器というものが存在しないこととも関連があるかもしれない。一般的に物理量の観測や測定に関連して、その機器や測定法の標準化や国際比較に際して、その物理量の定義のために原器が必要である。最近、長さの国際原器の再設定に日本の関係機関が重要な役割を果たしたことが話題になった。地味な仕事ではあるが、技術開発の

根元を支えているのが、この原器の存在である。流量は  $L^3/T$  次元であるから、長さと時間の原器を参照することで作業はされているが、流量計測自身に原理的な基礎が求められている。かつて、変動する体積流量を直接法で測定出来るようになれば、流量の原器とする方法が作れるかも知れないと議論したことがある<sup>3</sup>。

結局、それもこれも根本的に  $Q=AV$  パラダイムの中で、きちんとした科学的な評価法を採用していないことに起因していると言えよう。

工業プロセスの基礎量である温度や圧力の測定は産業の基盤技術である。そこでは、それらが単独で使用されることはほとんどなく、流量と大いに関連して同時に知ることが必要とされている。つまりそれらを組み合わせることで、プラントの状態を観測・監視し管理している。

一例をあげよう。原子炉の熱出力の測定には、原子炉内の冷却水(feed water)の出口での温度上昇とその流量の積から求めている。したがって、流量の測定精度が非常に重要で、原子炉運転の安全尤度もその精度で規制されている。現状では温度測定の精度は非常に高いので、専ら流量計の測定精度が原子炉の熱出力の精度として規制の基礎事項になっている。そして流量計の許容精度を現行の 2%から 1%に改善することで、熱出力を 1%増加することが可能なのではないかという、Meter Uprate 提案が議論されたことがあるほどである<sup>4</sup>。

このような状況は原子炉だけでなく、一般の化学工学プロセスや製薬プロセスを扱うプラントでも然りで、今後この問題が重要となることが予想されることは、最後に述べることにする。

### ☆流れは変動している

流動場は、厳密な意味で定常流ではなく、たとえ微小であっても、変動している。それに伴って空間分布も変動しているからその空間平均であるが、時間的な変動に注意を払われているようには思われない。流量計測の時間分解能が

さほど高くはなかった時代では、複数回の測定の単純な時間平均でも通用したであろうが、前にも述べたように、流動場の計測法が革命的に進化した現状では、より慎重にことを進める必要が出てきている。本稿では、その点に関して数点を考察したい。

### ① 時間平均はどうとれば良いのか

電子回路や演算装置の高速化により、求めた物理量から流量への換算が高速化し、連続的に表示することすら可能になっている。そのためにあたかも表示されている量がその時点での瞬時流量を示していると誤解されている。実際は複数回の測定の平均をとった移動平均でしかないのであるが、その際にその幅をどのように設定したら正しい流量となるのかを検討されている様子は見えない。それは、現場の実流の変動にどのような周波数特性があるかによって決まるはずで、一概に機器側の都合だけで決定できるわけではないはずである。実流回路に極端な周期性がある場合には、その周期に平均操作の時間幅があってしまうと、極端に異なった値を与えてしまう可能性がある。

流動場は常に変動していることを考慮すると、変動特性と測定時間(平均化時間)とは相い

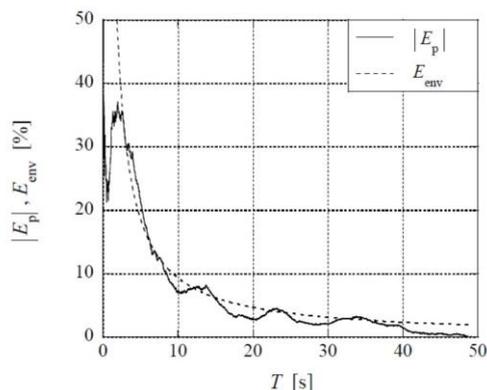


図2 測定時間で誤差がどのように変化するかを調べた結果。数値計算と実験の比較。3 Hzの振動特性がある場合。

れない関係が存在することが調べられている。それによると、測定精度(E)は流量測定場での時間変動(その角周波数 $\omega$ )と測定時間Tに逆比例することが知られている: $E \propto 1/\omega T$ 。

つまり、流量の正確な測定とその誤差の正しい評価のためには、流動場の変動特性を知る必要があり、その上で、その時定数と測定時間の積を大きくする必要がある。これは結局、測定場での振動特性を知る必要があることで、現在の単純な  $Q=AV$  パラダイムからの脱却の必要性を示唆していることなのである。

### ② 校正方法は

校正において、測定値の精度はあくまで校正装置の特性以上のものを保証できないことは避けられない。流量計の校正に用いられる手法はいくつかあるが、液体流量において最も一般的な手法が静的秤量法である。この手法においては、一定時間の間、流路に流体を流してその重さを秤量して単位時間あたりの流量としている。他の校正方法(体積法)においても、同様であり、一定時間の積を時間において除することになる。例えそれらの測定が連続的に行えるとしても、基本的にはある一定の時間幅での時間平均であり、連続計測したものは、その移動平均(仮に時間幅 T とする)である。そのような特性を持つ校正装置を用いた校正結果は、あくまで T 時間の平均であり、例えかなり速い表示器の変化で連続的に表示されたとしても、あくまで T という時間分解能を超えることはできない。一般的に流動場は時間的に変化しているから真の流量が時間変動していた場合、使用する流量計の時間分解能 > 校正装置の時間分解能以上の早い変化を測定できる訳ではない。変動流がもつ時定数(変動がもつ時間特性)が流量計の時間分解能よりもはるかに大きい場合には問題とはならないだろうが、それよりも短い時定数である場合には、流量計はその変動に追随することができていない。このような特性を利用者はどれほど理解

しているだろうか。あるいは流量計メーカーは利用者にどの程度理解してもらえているのだろうか。

そもそも、流量計を取引に使う場合、例えば水道メータを考えた場合にも分かるように、積算量に対する精度が求められる。したがって、仮に流量計が変動に追従していなくとも、最終的な値さえ整合が取れば良いことになる。また、各種校正設備においては変動を極力小さくすることに傾注されているため、一般の配管に比べれば校正時における変動の影響は、おそらく小さいであろう。これらのことが、変動に対する流量計の応答性を検討することに対する弊害になっているのではないだろうか。

しかしながらここで、変動する流量に対する校正方法が容易ではないことも記しておく。執筆者らは、変動流に対する各種流量計の応答性を調べるとともに、基準となる流量をどのように作り出すかを検討してきた<sup>5</sup>。すなわち、瞬時の流量の基準となる値をどのように得るか、という命題である。例えば、一連の流路中のどこかに変動を発生させる装置を組み込んだとしよう。この発生装置の動き等から変動の基準値が算出されるものとする。当然、この発生装置から被試験流量計までは、それなりの距離があり、この距離の間に変動はなまされ、あるいは他の変動が組み込まれる。それゆえに変動発生装置において保証された瞬時の流量の値が被試験流量部において同一であるという保証は、まったく無い。確認する術は唯一、被試験流量部における第一原理に

よる計測、つまり瞬時の流速分布から流量を算出することだけであるように思われる。変動装置による流量変動の再現性を高め、第一原理により試験部の瞬時流量を変動装置と関連付けることにより、ようやく変動の基準値を考えることができるようになる。

### ③ 国際的動向は

個々の流量計の変動への応答性を調べる試みは多いが、前述のように基準がない状態では何の瞬時値を計測しているのか分からない。近年、欧州においても変動流をどのように定義するか、という研究が進展してきている。例えば、ドイツ PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)が中心となり、Euramet (European Association of National Metrology Institutes)という組織体制の下、水や石油関連の変動流に関するプロジェクトが展開されている。欧州各国が、定められた変動流を作る装置を製作し、それらを比較して欧州におけるスタンダードにしようとする試みである。欧州においては各国間のエネルギー関連の取引が多く、流量計に求められる役割が各段に高い。また、規制関連においても各国間のコンセンサスは非常に重要である。上記のプロジェクトが直接何らかの取引や規制にかかわってくるか、現時点では不明であるが、欧州の計量分野においては、「変動する場の計測」に対する関心が高まりつつあることは間違いない。

<sup>1</sup> US Patent 3564912, Feb. 23, 1971

<sup>2</sup> T. Ohkubo et al., On the accuracy evaluation of ultrasonic Doppler flowmeter, ASME ICONE14-89682

<sup>3</sup> G. Mattingly, Private communication

<sup>4</sup> 岡本孝司他「原子炉出力向上に関する技術検討評価の結果について」原子力学会誌 Vol.50,

No.2, p772, (2008)

<sup>5</sup> N. Furuichi et al., Experimental study to establish an evaluating method for the responsiveness of liquid flowmeters to transient flow rates, Flow Meas. Instrum., 82 (2021), 102067