

流量計測に科学を！

武田 靖^a・古市 紀之^b

今では古典物理学に分類される流体力学というパラダイムには、かねてからかなり自虐的に言われている特性がある。それは非常に堅固に新しい理論や手法を取り入れることに時間を費やすと言う事である。Leibovich は少なくとも 20 年はかかると述べている¹。それは数学的取り扱いを厳密に行うことも大いに関係しているであろう。科学の名家であるイギリスでは、まだ現在でも流体力学、特に理論研究は数学科や応用数学研究所で行われている。強い非線形性を持つ我々がナビア・ストークス(NS)方程式を、Reynoldsが見立てた様に、解析的に解くことが原理的に出来ないことがはっきりとし、決定論的な方法論が成立しないことがわかっているにも拘わらず、統計流体力学がそれ程受け入れられていない現状も、また然りである。

当然、実験的研究についても同然である。ダビンチの渦のスケッチはあまりにも有名であるが、彼ができたのは定性的な特徴を記すことであり、それはその後の流れの可視化技術に繋がる観測方法である。定量的な観測がその本旨である実験科学として熱線流速計(HW:Hot Wire)やレーザードップラー流速計(LDA:Laser Doppler Anemometry)の利用が当然の如くに行われる様になるには、原理の発表から 30 年ほどかかった。

筆者は超音波流速分布測定技術(UVP: Ultrasonic Velocity Profiler)を実験流体力学研究用に開発したが、最初の学会発表論文²は 1985 年、印刷論文³は 1986 年で、多くの分野で

一般的に使われる様になるまで、やはり 30-40 年かかっている⁴。PIV(Particle Image Velocimetry)についても、イリノイ大学の Adrian⁵が手掛けたのは筆者とほぼ同じ時期である。

UVP も PIV もそれまでの点測定から線・面測定へと大幅な変更をもたらした。その様な観測技術の必要性は 1988 年にニースの Frisch⁶が米国物理学会誌 Physics Today で述べている。現在ではようやくそれらの新しい手法が一般的に認知されて研究に使われる様になった。開発を進めた人間にとっては実に隔世の感がある。

翻って、より一般的で工業的・産業的に非常に重要な流量計測技術はどうだろうか。まずここで述べておきたい事が数点ある。初めに、流量というのは、あらゆる物体を対象としてその移動量の事である。産業ばかりでなく、あらゆる社会活動の中で、物が移動しないことはない。物体のあらゆる状態-気体、液体、固体、それらの混在した混相体-において、その移動量を知ることは、状況把握のためにもっとも重要な基本項目である。二点目に、我々が扱う一般的な流動場というのは、空間的な広がりがあり、時間的にも変動している。その空間的な場の形状は、境界が厳密に固定されている管やダクトがその大半ではあるが、もっと広い意味での自然界における流動を考えれば、河川や暗渠など、あるいは土石流まで含めてどの様な状況でも起こりうるものである。それらは広い空間的広がりが考えられるだけでなく、忘れやすいのは、それらは決して時間的にも一定な定常流ではなく、変動流であるのが一般的である。

そのようにその対象が非常に広い現象を扱うのが一般的な流量測定である。自然環境を含め

^a 北海道大学名誉教授、元スイス・チューリッヒ工大特別研究員

^b 産行総合研究所

て考えると、その形態的な拡がりが多様に及び取り扱う大きさも膨大すぎる。そのような状況での移動量を定量することの重要性を無視することはできないが、ここではより工業的に取り扱いが多い管、特に配管用として一般的に使われる円管を対象とした流量を考えることとする。

図1に流量計測法、あるいは流量計の現状を分類したものを示す⁷。対象とする物体は液体が65%、気体35%である。実はその他に気液二相流や固体である粉流も工業的には重要であるが、現状の流量測定技術は全くの未発達と言っても過言ではない。流量として求める次元では体積流量(L³/T)と質量流量(M/T)がある。特に気体では体積と質量の変換に密度を使うが、その関係には気体の圧縮性のために、圧力や温度といった他の物理量が大きく影響するので、それぞれを別個に求める方法が採用されている。

測定法としては、移動物体の量(体積や質量)を直接求める直接法と、移動量(平均速度であることが多い)が他の物理変量と相関していることを利用して求める間接法がある。物質の移動体積を直接もとめることは非常に難しく、現在実用されている流量計測法はほとんどが間接法であり、直接法は体積流量についてはほとんど実用化されていない。質量流量については、ようやく近年開発されたコリオリ法が上げられる。以後の考察では体積流量の測定を対象とする。

現在使用されている流量計測法の基本原理は $Q=AV$ である。Aは配管断面積、Vは平均流速である。流動場の速度は一般的に3次元ベクトルであるが、配管内流れは軸方向成分のみを考えれば良い。その次元はL³/TであるからQは体積流量になり、質量流量にするには流体の密度をかければ良い。また配管断面積は一定と精度良く知れる。したがって、流量計測の良し悪しは一意に平均流速の測定の程度にかかっていると云える。ところがこの平均流速を正しく求める

方法がなかった。つまり流れは配管内で空間分布しているが、測定位置でそれを知る術がなく、したがって面平均の流速を完全な形で直接求める方法がなかった。そのために色々な物理現象を使って、それと平均流速との関係性を使って流量を求めるといのが間接法である。実は各種の測定法の多くを日本の技術研究者が開発し流量計として実用化したのである。その際、いわゆる流体工学の知識や理論を多用し、実験による係数や相関性の裏付けを採用した。そのため恰も科学を利用して測定しているかのように思われているのが現在の流量計測パラダイムと言える。

そもそもこの $Q=AV$ という基本原理自体には科学は一切かかわっていない。それは、そのような形で流量を求める方式が古代ローマ時代以前から行われてきたものであるというのがその理由である⁸。しかもギリシャの科学=自然哲学がローマに伝達される前のアレキサンドリアの時代であるから、当然それは近代科学の発生などよりはるか以前の話である。しかもまだロゴス Logos の入っていないテクニク Technique の時代で、テクノロジー Technology とすらとても言えない。当時どのようにして平均流速を求めたかは明らかではないが、流れに分布があるなどという見方は天才ダビンチにすらなかったであろう。初めに述べたパラダイムの保守性で言えば、2000年以上前からできていたパラダイムに、近代科学が発生してから300年以上経過した現在でもその科学の見方が取り入れられていないということになるだろうか。

ではどう考えれば良いのかを考えてみよう。それには流量をきちんと科学的に定義しなおすことである。上述のように流れには流速の分布がある。配管内のある断面を通過する物体の移動量であれば、流速には向きがあるからベクトル量である。そして近代科学の特徴は微分・積分という

手段をもつ数学的表現を使えるということであるから、その道具立てで定義すると流量は以下の式であらわされる。

$$Q(t) = \iint_A \mathbf{u}(x, t) dA$$

ここで \mathbf{u} はベクトル量の速度分布で位置と時間に変数である。つまり空間的に分布し時間的にも変動していることを表している。 A は測定断面を表す平面ベクトル。速度分布は時空間的に変動していて時間と空間とは変数分離はできないから、その面積分であらわされる流量は時間的に変動している。当然このような定義は以前から考えられてはいたのであろうが、肝心の測定位置での流速分布の捕捉ができなかったため採用できなかったのである。それが $Q=AV$ のパラダイムから脱却できなかった理由であろう。

ところが実験流体力学では流動場の観測手段に革命的な進展が起きてきた。流量測定が流量計という形で産業用に大幅に採用されるようになり、各種の計測が行われるようになった当初は、熱線流速計 (HW) やその後のレーザー流速計 (LDA) など空間一点でのいわゆる点計測であり、空間分布の形状を瞬時に求めることは出来なかった。ところが 40 年ほど前から超音波流速分布測定法 (UVP) やレーザー PIV 法などが開発され、点計測から線・面測定による分布形状の把握が可能になった。それは現在ではほとんど一般化していて、点測定を採用することはほとんどなくなっている。詳細に触れることはしないが、現状ではそれが一般的であるというのが流体力学に携わっている者には常識化している。

流動場の把握が点測定や単純な空間平均ではなくなっている例として、最も身近にある流動場である気象予報がある。そこではすでに大気の流動分布状態が時間によって変動することが

普通のように示され使われている。風向の状況やその変化が表示されている。ところが流量計測を専門としている陣営では、そのような進展・発展を採用しようという動きはほとんど見られない。それは流量計測の大家である Merzkirch が述べているように⁹、「担当者の大半が電子・電気工学の技術者であるから」というのは言いすぎで、流体力学・工学者が真剣に取り組んでこなかったからという方が正しいだろう。つまり流量計内部での流体の挙動を直接的に扱おうという流体力学研究者が出てこなかった。あるいは $Q=AV$ パラダイムを破壊してでも発展させようという努力が不足していたということもできるだろう。

現在の流量計の利用について、そのタイプによらず、設置条件にはさうとう厳しい条件が課されていて、ISO や JIS で規格化されている。簡単にまとめると、ほとんどの流量計は測定点で流れが十分発達していることや、管内の流速分布に軸対照を前提としているので、設置場所の上流や下流の条件や、流量範囲の限定、満水条件などが満たされることが必要であり、その流量計がもつ最高の仕様性能を実現するのは非常に困難だろうと思わせるものがある。利用者がそれらを十分に理解して使用できるかどうかは、ひとえに供給側の努力によるだろう。

筆者これまでにそのような弱点を補強するために、流量計やその検定方法、校正方法を含めた各段階で、Profile Factor や Factory Factor¹⁰ を考慮する必要があることを提案している。因みに Profile Factor とは、流量計算に前提としている流速分布形状と実流の分布形状との差異を補正するための係数で、Factory Factor とは検定装置での流速分布形状と実流の測定部での分布形状の差を補正する係数のことである。つまり実流の測定位置での状況をきちんと把握することを求めたのである。しかし残念ながら採用される気配は見られない¹¹。

その様に脱却できないパラダイムの中で、実は表立って言われていない問題が時代の要請によって顕在化しつつある。それは単に日本国内だけの問題ではない。流量測定は工学的プロセスの基本量の把握であるから、世界中のどこでも同じように問題となる。ここでは特に今後の

産業の発展には避けて通ることの出来ない二点について、次章で詳述する。

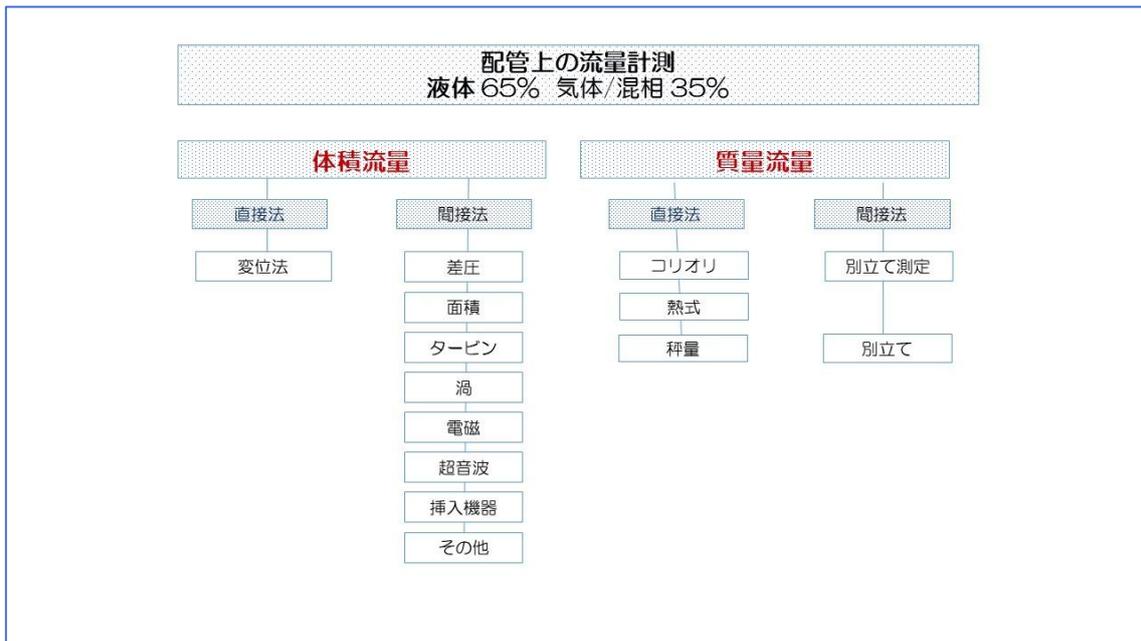


図 1 流量計の形式分類

-
- ¹ S. Leibovich, (2003) Preface, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 35 January
- ² Takeda Y, (1985) Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method, Fluid Control and Measurement, FLUCOME TOKYO '85, Ed. M. Harada, Pergamon, Tokyo, 851
- ³ Takeda Y. (1986) Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method, Int. J. Heat & Fluid Flow, Vol.7, No.4, pp. 313-318
- ⁴ Takeda Y., (2012) Ed., Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow, Springer
- ⁵ Adrian, R.J., (2005) "Twenty years of particle image velocimetry", Exp. in Flu. 39, 159-169
- ⁶ Frisch, U., & Orszag, SA., "Turbulence: Challenges for theory and experiment", Physics Today 1990 January, p24
- ⁷ Endless Hauser 社の資料から作成した。
- ⁸ 小川胖 「流れわざのシルクロード」日本工業出版 2006 年
- ⁹ Merzkirch, W., Fluid Mechanics of Flow Metering, Springer, 2005
- ¹⁰ Takeda, Y., "On the traceability of accuracy of ultrasonic flowmeter", ICONE14-89803, (2006)
- ¹¹ 武田靖「流動場と流量計測におけるパラダイムシフト」計測技術 Vol.37, No.3, p1 (2009)