不活性ガス濃度法による気体流量の測定

井伊谷 鋼 一・田 中 信 寿・木 村 松 弘

京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

(昭和 44 年 7 月 4 日 受付)

Gas Flow Rate Measurement by Inert Gas Concentration Method

Koichi INOYA, Nobutoshi TANAKA and Matsuhiro KIMURA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

(Received July 4, 1969)

The concentration method for flow rate measurement is substantially distinct from other methods. It is often used to measure flow rate of water through a water-turbine of power station, but few reports of measuring gas flow rate by the concentration method have been published. Some experimental results of flow rate measurement of air by this method is herein presented. The flow rate of air is obtained by measuring both injection rate of inert gas and inert gas concentration of mixed gas, and then substituting these values into eq. (1) or (2).

The accuracy of this method depends on whether the inert gas is perfectly mixed or not. In other words, after injected inert gas is mixed with the main flow through a mixing part, the inert gas concentration must be uniform over a sampling plane normal to the direction of flow. In this work, it is examined how long distance from an elbow is required in order to attain a stable concentration profile, when an elbow is used as a mixing part and the flow rate of air is 0.5 to 1.5 m³/min. in 1 $\frac{1}{2}$, 2, 2 $\frac{1}{2}$ and 3 inches standard gas pipes.

Consequently, the stable concentration profile is attained at about 80 cm downstream from an elbow, and its distance does not depend on both the main flow rate of air and the pipe diameter. The accuracy of this method using an elbow is within $\pm 1\%$. The dispersion of measured values is within $\pm 2\%$ in this work. In spite of some insufficient results, this work may be the knowledge to measure gas flow rate by the concentration method.

1. ま え が き

流量測定は工業計測における重要な計測の1つであり、古くから各方面の工業分野で種々の流体についていろいろの方法が行なわれてきた。最近では工業分野の多様化とともに、自動制御の普及によって流量計測も複雑、多岐にわたり、各種の特徴ある方式が数多く使用されている¹⁾。

それらは流量測定の目的により選択されねばならないが、工業分野での流量計測の多くは絞り流量計を用いているようである²⁾。この方法の短所は絞り部の前後にかなりの直管部を要すること、絞りによって圧損

を生ずること、管部のよごれによる影響や絞り部への異物の付着による影響などの経時誤差、および取り付け時や製作時に生ずる固有誤差などが存在すること、などである。したがって正確な測定を保持するためには検定を行なう必要があるが、その検定はかなりめんどうである。また、大流量の測定や粉じん気流の測定に使いにくいことも短所であろう。

ここで述べる不活性気体注入による気体流量測定法は物質を流して流量を測定する方法として分類することができ、その内で濃度法といわれるものである。これは上流で注入した物質の濃度を十分混合したと思われる下流において測定し、その濃度から流量を決定す

る方法であるが、塩水を用いる塩水濃度法は古くから水力発電所の水車流量の測定に用いられている。このように、濃度法が液体の流量計測に使われた例は多くあるが、気体の流量計測に使われた例は少ないようである。

J. F. Kemp は脈動流の流量測定を主目的として濃度法を空気の定常流および脈動流の流量測定に応用している³⁾。使用している管の径は約 12 cm であり、流量も相当大きい。本報告では不活性気体の混合を完全にすることによって注入法やサンプリング法を簡単にしているのに対して、Kemp の研究では混合が十分に促進されなくても測定が可能であるように不活性気体の注入法やサンプリング法にかなりのくふうをしている。

この測定法の得失を絞り流量計との比較を念頭において考えると、絞り流量計のように直管部を必要とせず、施回流などの流れの乱れがあっても関係なく、むしろ、そのような流れの乱れを積極的に利用することができる。また、検定のさいには、濃度分析計を独立に校正することによって流量計測の検定が簡単に行なえる。さらに、水力発電所の水車流量測定にみられるように大流量測定への可能性を含んでいる。いっぽう、短所としては、(イ) 異種物質を注入するために流体が汚染をきらうときには使えない。(ロ) 濃度測定時には定常的に不活性物質を注入するため、割合多くの不活性物質を必要とする。(ハ) 濃度分布が管断面で均一でないと測定誤差となる。(イ) と (ロ) の難点については、濃度測定機器の発達によって ppm 程度の濃度分析が可能になれば解決されるだろうし、この測定法の使用範囲が拡大されるだろう。したがって、(ハ) の短所がこの計測法を実施するときの重要問題となる。

この点に注目し、従来、使用されたことの少ない気体流量測定の場合について実験を行ない、測定誤差および精度の検討を行なった。特に工業配管で常時使用されるエルボに注目し、不活性ガスを含んだ流体がエルボを通過した後、どの程度の距離で混合が完了し、ほぼ安定した濃度分布を達成するかを求めた。また、濃度分布の不均一による測定誤差も考えた。同時に、この結果は管路中における流体混合についての 1 つの知見を与えるものといえる。

2. 測定原理と実験の概要

濃度法による流量測定は上流において不活性気体を

①: inlet nozzle	⑨: Göttingen precision manometer
②: injection point	⑩: turbo-blower
③: mixing part	⑪: stop valve
④: sampling point	⑫: filter
⑤: gas analyzer	⑬: voltage supply
⑥: inclined-tube manometer of ethanol	⑭: pen recorder
⑦: differential pressure type flow-meter	⑮: flexible-pipe
⑧: Argon gas bomb	⑯: vacuum-pump
	⑰: needle-valve

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

定常的に注入し、十分混合したと思われる下流において少量の流体をサンプリングし、その濃度を測定する。このとき、不活性気体の流量を q [m^3/min]、サンプリングした混合気体の濃度を c [vol %] とすれば、不活性気体を注入する前の管路の流量 Q [m^3/min] は次のように物質収支から求まる。

$$Q = (100 q/c) - q \quad (1)$$

多くの場合、濃度法では管路の流量 Q に比してごく少量の不活性成分を注入するので $Q \gg q$ であるから上式は次式のように考えてよい。

$$Q = 100 q/c \quad (2)$$

これが濃度法による測定原理である。

この測定法の説明を兼ねて本実験のフローシートを Fig. 1 に示す。不活性気体（アルゴンガス）をニードルバルブの調節によって定常的に流す。あらかじめ湿式ガスメータで校正した絞り管を用いてアルゴンガス流量を測定する。この絞り管の差圧はゲッチングン微差圧計を用いて読み取る。内径 4 mm の管を用いて管中央において下流向きにアルゴンガスを注入する。不活性気体を十分混合させるために設けた混合部を通過した流体を適当な所で連続的に真空ポンプでサンプリングし、ガス分析計に流す。本実験で用いた連続ガス分析計は白金線をクロス形にブリッジに組んだ熱伝導率測定方式の分析計である。連続的にガス濃度を測定することができるので、濃度が安常になったことを

確かめることができる。性能は 0~5 vol % Ar in Air に対して 0~5 mV DC の出力である。管路の流体は空気ターボブロワにより吸引し、2 in ガス管用の入口ノズル（ガラス製）によって流量測定を同時に行ない、濃度法による流量測定値と比較する。空気流量は 0.5~1.5 m³/min であり、ガス分析計の性能から、アルゴン濃度が 1 vol % 程度になるように、アルゴンガス注入量を調節した。また、ガス分析計へのサンプリング量は 0.5 l/min である。

3. 入口ノズルの校正

まず、オリフィスを自家製の水置換形ガスホルダー（内容積 0.77 m³、断面積 0.64 m²）を用いて校正し、次に、そのオリフィスと入口ノズルを直列におくことによって入口ノズルの校正を行なった。その校正結果を Fig. 2 に示す。横軸は $\Delta p/\rho$ で Δp は入口ノズルの負圧であり、エタノール封入傾斜管形微圧力計の読み [cm] である。 ρ は空気密度 [kg/m³] である。な

Fig. 2 Calibration curve of inlet nozzle

Fig. 3 Schematic diagram, when an orifice-plate and a Steam-and-disk are used as mixing part (2 in SGP)

お、この微圧力計の拡大率は 10.5 倍である。Fig. 2 中の破線は JIS⁴⁾ の計算式によって求めた校正曲線である。これらの 2 つの校正曲線では 4~6% の系統的差がある。その原因としては入口ノズルがガラス製であるために JIS の寸法規格通り作られていないことや、オリフィスとガスホルダーによる校正操作が複雑であったことなどが考えられる。

4. 濃度法による流量測定の精度

不活性気体を注入する上流部から、混合気体をサンプリングする下流部までの間で十分な混合が達成されれば、濃度法による流量測定の原理がみたまされ、(1) 式ないし、(2) 式で管路の流量が測定できる。そこで、Fig. 3 に示すようなステアマンディスク状の板（上流側）とオリフィス板状の板（下流側）とを 2 in ガス管へそう入し、オリフィス板から 35 cm の距離をおいてサンプリングし、濃度を測定した。サンプリング位置を半径方向に 4 点移動した。管中央 ($x/R=0$)、中央から半径の 1/3 の位置 ($x/R=1/3$)、中央から半径の 2/3 の位置 ($x/R=2/3$)、管壁 ($x/R=1$) の 4 点である。

空気流量を 1.45, 1.22, 0.97, 0.75, 0.57 m³/min の 5 点を設定し、これに近い流量値になるように空気流量を調節した。アルゴンガス流量は前述のとおり、混合ガスのアルゴン濃度が 1 vol % 近くになるように調節した。測定値（アルゴンガス流量 q m³/min とサンプリング混合気体濃度 c vol %）から (1) 式により空気流量 Q_c m³/min を計算した。この結果を入口ノズルによる流量 Q_N との相対値 $(Q_c - Q_N)/Q_N$ の形で Fig. 4 に示す。付字 c は濃度法によるもの、付字 N は入口ノズルによるものであることを示す。

半径方向の濃度分布の一例を空気流量 0.97 m³/min の場合について Fig. 5 に示す。これでは、混合が管断面で、まだ十分に均一でないで管断面について平均濃度 $\bar{c}$ を求めて濃度分布が均一であるとしたときの Q_N と Q_c の関係を求める必要がある。それを流量 0.97 m³/min の場合について説明する。

まず、実験のさいの流量 Q_N は 0.97 m³/min 近辺の値ではあるが、正確に 0.97 m³/min でないし、アルゴンガス流量 q もおのおのの測定について 9.798 l/min 近辺の値ではあるが正確に 9.798 l/min でない。そのため、実験値として得られた濃度 c を $Q_N=0.97$ m³/min, $q=9.798$

Fig. 4 Q_c vs. Q_N (2 in SGP) Fig. 5 Radial concentration profile (when $Q_N=0.97 \text{ m}^3/\text{min}$ in 2 in SGP)

l/min (混合気体の濃度が 1 vol % になるということ)の状態での濃度 c' に修正する。 c' は相対的に実験値 c から計算できるとすると、(1)式から、

$$\frac{c'}{c} = \left(\frac{9.798}{970 + 9.798} \right) / \left(\frac{q}{q + Q_N} \right) = \frac{q + Q_N}{100q} \quad (3)$$

(3)式によって求めた修正濃度 c' を点つづりしたものが Fig. 5 である。

また、半径方向の濃度分布と速度分布から平均濃度 $\bar{c}$ は次式によって求まる。

Fig. 6 Schematic diagram of pipe line, when an elbow is used as mixing part

$$\bar{c} = \int_0^R 2\pi c r dr / \pi R^2 \bar{u} \quad (4)$$

ここで半径方向の速度分布は均一であると仮定できるとし、また実測値は $r=0, R/3, 2R/3, R$ での値だけであるから、それらの点を折線で結ぶと、(4)式の積分は次のように求まる。

$$\bar{c} = (c_0 + 4c_1 + 8c_2 + 5c_3) / 18 \quad (5)$$

付字 0, 1, 2, 3 はおのおの $r=0, R/3, 2R/3, R$ の位置に対応する。(5)式によって求めた $\bar{c}$ を Fig. 5 において鎖線で示す。

この平均濃度 $\bar{c}$ によって空気流量を求めると、

$$Q_c = 979.8 / \bar{c} - 9.798 \quad (6)$$

また、このときの入口ノズルによる空気流量は $0.97 \text{ m}^3/\text{min}$ であるから相対値 $(Q_c - Q_N) / Q_N$ は次式で求まる。

$$(Q_c - Q_N) / Q_N = (100 / \bar{c} - 100) / 99 \quad (7)$$

他の流量設定値 ($1.45, 1.22, 0.75, 0.57 \text{ m}^3/\text{min}$) についても同様に $(Q_c - Q_N) / Q_N$ を求めて連ねたものが Fig. 4 の実線である。半径方向の流速分布が均一であるという仮定があるが、これが濃度分布が均一であるときの Q_c と Q_N の関係を与える。この実線に基づいて、濃度法による測定値 Q_c が正しいとして入口ノズルの校正曲線を求めたものが Fig. 2 の鎖線である。

濃度法による測定値と入口ノズルによる測定値とは数%の系統的差がある。これが入口ノズルの校正曲線 (Fig. 2 の実線) が正しくないのが、あるいは、他に原因があるのかわからない。また、本実験装置での濃度法による流量測定の精度は 2% 以内である。

5. エルボを混合部としたときの流量測定

濃度法による流量測定を有効に適用するためには、不活性気体を十分に混合させるものが必要である。こ

こでは工業配管で常時使用されるエルボに注目し、エルボを通過した流体がどの程度の距離で混合を完了するか実験を行なった。使用した管路の管径 (インチ) は $1\frac{1}{2}, 2, 2\frac{1}{2}$, および 3 である。管路の構成を記号的に Fig. 6 に示す。アルゴンガスの注入は管中央で下流向きに行ない、またサンプリングは管中央で行なった。

3 in 管についてサンプリング距離 (エルボからサンプリング位置までの距離) と流量測定値と

Fig. 7 Effect of sampling distance (3 in SGP)

Fig. 8 Effect of sampling distance

Fig. 9 Radial concentration profile, when an elbow is used (in 3 in SGP at 135 cm downstream from an elbow)

の関係を Fig. 7 に示す。たて軸は入口ノズルによる流量 Q_N' と濃度法による流量 Q_c の相対値である。入口ノズルによる流量として Q_N の代わりに Q_N' を使ったのは、入口ノズルの校正曲線として Fig. 2 の鎖線を使ったからである。つまり、前章で求めた濃度法による入口ノズルの校正曲線を使った。他の管径についての結果を、実験点を省いて Fig. 8 に示す。ま

た、3 in 管の場合の半径方向の濃度分布を Fig. 9 に示す。これはエルボから 135 cm 離れた位置のものである。修正濃度 c' の求め方は前章と同じである。

これらの実験結果から、どの管径についても、流量の大小に関係なくエルボから約 80 cm の距離で混合がほぼ完了したとみることができて、濃度法による流量測定が可能となる。流量の大小にかかわらず、ほぼ同じサンプリング距離をとればよいことについては次のように定性的に説明できるだろう。エルボ部で生ずるかく乱は流速の増大とともに激しくなり、そのため、その後に混合を完了するに要する時間は短くなる。いっぽう、流速が増

大すると同一の距離を通過するに要する時間は短くなる。けっきょく混合に要する距離は流量の大小にかかわらず、ほぼ一定になる。1 1/2 in 管について他の管径のものと同様の傾向の異なる曲線を示しているが、これは Fig. 6 に示すようにアルゴンガスの注入点が他のものよりエルボに近かったためであろう。これまでの測定ではアルゴンガスの注入方向は下流向きであったが、上流向きに注入した場合について、2 in 管で実験を行なったが、下流向きに注入した場合

とほぼ一致した。

入口ノズルの校正曲線として、Fig. 2 の鎖線（濃度法による流量測定が正しいとして求めた校正曲線）を用いているので、Fig. 7, 8 において十分なサンプリング距離では測定値 $(Q_c - Q_N') \times 100 / Q_N'$ は 0 の付近に集まるはずである。Fig. 7, 8 でそのような理由としては、Fig. 4 における実験値から Q_c と Q_N の関係を求めるさいに半径方向の流速分布は一定であるというような不完全な仮定を行なっているために Fig. 2 の校正曲線（鎖線）の不正確さ、あるいはエルボ通過後のサンプリング点で濃度分布が完全に均一になっていないこと、また、測定値の数が少ないことなどが考えられる。しかし、Fig. 9 をみると、ほぼ均一な濃度分布を示しているの、濃度分布の不均一さが主な原因ではなく、校正曲線の不正確さが原因であると考える。

参考のために、エルボを 2 個そう入したときのサンプリング距離と相対値 $(Q_c - Q_N') / Q_N'$ の関係を Fig. 10 に示す。なお、サンプリング距離は下流側のエルボからの距離である。また、このときの管路の構成を図中に示す。

6. む す び

濃度法による流量測定の要点はどの程度、不活性成分が均一に混合するかということであるが、それを工業配管でよく使用されるエルボについて、流体が空気の場合で実験的に検討を行ない、エルボによって、かなり簡単に混合が促進されることがわかった。厳密に考えれば、半径方向に濃度分布を均一にすることは不可能に近く、それが濃度法による測定法の確かさの限界であろう。Fig. 9 の濃度分布にみられるように $\pm 1\%$ 程度の測定誤差が許されるのであれば、濃度法による気体流量の測定をエルボの前後を利用することによってできるであろう。また、測定精度も使用するガス分析計の性能の向上によってかなり向上するであろう。

また、固気 2 相流に適用した場合や管径あるいは、流量が大きくなった場合などについて検討を行なうことは残された課題の 1 つであるし、不活性ガスの注入位置、注入方法（たとえば、半径方向にわたって多くの場所から注入する）あるいは、サンプリング法（本実験では管中央の 1 点のみでサンプリングすると考えた）の影響なども、この測定法の精度および操作を実施するさいの難易度と共に検討されなければならない問題であろう。

記 号 説 明

- c : concentration of inert (Argon) gas [vol %]
 c' : corrected concentration of inert (Argon) gas [vol %]
 $\bar{c}$: average concentration of inert (Argon) gas [vol %]
 q : injection rate of inert (Argon) gas [m^3/min]

schematic diagram, with same symbols in Fig. 6
 keys are the same in Fig. 7

Fig. 10 Effect of sampling distance, when two elbows are used in 2 in SGP

- Q : flow rate of air [m^3/min]
 Q_N : flow rate of air with solid line in Fig. 2 [m^3/min]
 $Q_{N'}$: flow rate of air with chain line in Fig. 2 [m^3/min]
 Q_c : flow rate of air, measured by inert gas concentration method [m^3/min]
 r : radial distance [cm]
 R : radius [cm]
 u : air velocity [cm/s]
 $\bar{u}$: average velocity [cm/s]

参 考 文 献

- 1) 工業計測技術大系編集委員会編：流量 上, 下 (日刊工業新聞社-昭 39)
- 2) 藤村昭雄：計測と制御, 7-4, 232 (1968)
- 3) J.F.Kemp: J. of Basic Engineering (Trans. of the ASME), 83, 305 (1961)
- 4) JIS B 8330 送風機試験方法