二種の混合ガスの混合率および流量測定システムの 精度向上に関する研究

尹 鍾 皓*・向 後 晃**・川 嶋 健 嗣*・香 川 利 春*

Accuracy Improvement of a Concentration and Flow Measurement System for Binary Gas Mixtures

Chongho YOUN*, Akira KOGO**, Kenji KAWASHIMA* and Toshiharu KAGAWA*

This study intends to improve the accuracy of the concentration and flow measurement system for binary gas mixtures that was developed by two of the present authors¹⁾. This system is composed of a venturi tube and a laminar flowmeter connected in series. A basic examination on the viscosity estimate for binary gas mixtures and a preliminary measurement of the flow coefficient of the venturi tube are carried out. The procedure of concentration calculation based on the basic study is also shown. The estimate accuracy of the mole fractions of component gases and the flow rate of binary gas mixtures are experimentally examined using three kinds of mixed gas: CO₂-Air, CO₂-Ar and Ar-He. The results indicate that the mole fractions can be estimated with accuracy of 5% and the flow rate can be estimated with accuracy of 2%.

Key Words: gas mixture, gas concentration measurement, laminar flowmeter, venturi flowmeter

1. はじめに

屋外を含む作業現場において、異種ガスの混合比の迅速な測定が求められることがある。たとえば、ガス配管の保守点検作業においては、配管内にある可燃性ガスを安全な窒素に置換するパージ作業を行なうが²⁾、配管内のガスを無駄なく置換することにより、パージに使用される窒素ガスの量を減らすことができる。この種の作業を手早く、かつ無駄なく行なうためには、配管内における流量と混合比率計測を同時かつリアルタイムに測定する必要がある。

ガスの混合比率測定には、ガスクロマイクログラフ法³⁾、赤外線吸光度法⁴⁾、光干渉計式、熱伝導法、半導体法、超音波法⁵⁾などがある。これらの方法は当然であるが、測定精度やガスの種類の範囲が広いことなどに努力が払われており、測定系の応答速度に関心を払ったものではない。それゆえ、応答は数十秒程度と遅く、混合比が短時間で大きく変わる現場への適用は難しい。

そこで、実質的にリアルタイムで測定を行なうことができるベンチュリ管流量計と層流型流量計⁶⁾を用いて、二種のガスのモル分率と流量を同時かつ高速に求める計測システムが著者らによって提案された¹⁾。この測定システムが、ガスの混合比率を従来機器より10倍以上早い0.2秒で測定できることを、アルゴン-空気と二酸化炭素-空気を用いた混合ガスを用いて、実験的検証を行なった。

しかし、測定精度が±10%程度にとどまり、測定精度を向上することが課題であった。本研究ではこの課題を扱う。

2章では、すでに提案したシステム¹⁾の構造を中心に必要事項を説明する。3章では、前報まで^{1),2)}では、定数とみなしていたベンチュリ管の膨張係数および流出係数の検討と、粘度算定式の誤差補正を考察し、混合率が既知の場合に、流量および粘度が精度よく求められるようにする。4章は2つの流量計に生じる差圧から、流量と混合比を算定する問題を扱う。これは本論文の主題部分である。5章で結論を述べる。

主な記号

d_L	層流型流量計細管直径 [m]
d_V	ベンチュリ管スロート直径 [m]
D_V	ベンチュリ管入り口直径 [m]
G	質量流量 [kg/s]
k_V	ベンチュリ管流量計の係数 [m ²]
K_L	層流型流量計の係数 [m ³]

* 東京工業大学精密工学研究所 横浜市長津田町 4259

** ソニー株式会社厚木第2テクノロジーセンター 厚木市岡田 4-16-1

* Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Yokohama

** Sony Corporation, Atsugi Technology Center 2, 4-16-1 Okada, Atsugi

(Received September 29, 2010)

(Revised July 13, 2011)

l_L	層流型流量計の細管長さ [m]
m	分子量 [kg/mol]
n_L	層流型流量計細管本数 [-]
P_a	大気圧 [Pa]
P_L	層流型流量計入り口圧力 [Pa]
P_V	ベンチュリ管入り口圧力 [Pa]
ΔP_L	層流型流量計出力差圧 [Pa]
ΔP_V	ベンチュリ管流量計出力差圧 [Pa]
Q	体積流量 [m ³ /s]
R	ガス定数 [J/kg/K]
Re	スロート部レイノルズ数 [-]
T	ガス温度 [K]
x	混合ガスのモル分率 [-]
β	ベンチュリ管の直径比 $=d_v/D_v$ [-]
κ	比熱比(アイゼントロピック指数) [-]
ρ	密度 [kg/m ³]
ρ_v	ベンチュリ管入り口のガス密度 [kg/m ³]
τ	ベンチュリ管圧力比(Eq. 5) [-]
μ	粘度 [Pa s]

添え字

1	ガス 1
2	ガス 2
L	層流型流量計
V	ベンチュリ管

2. 測定原理

測定システムの概略図を Fig. 1 に示す。混合ガス成分のモル分率と流量を同時に知るために、測定原理の異なる2つの流量計、ここでは、ベンチュリ管と層流型流量計を用いた。

このシステムでは、精度向上が目的であるから、厳密を期すために、質量流量が両流量計で等しいという、物理的関係をもとに計算式を考案する。ベンチュリ管における、流量と差圧の関係は以下の式で与えられる⁷⁾。

$$Q_V = k_V \sqrt{\frac{2\Delta P_V}{\rho_V}} \quad (1)$$

ただし

$$k_V = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d_v^2 \quad (2)$$

C は流出係数、 ε はガスの膨張補正係数である。ここで与えられる流量の評価は体積流量であるから、質量流量は、

Fig. 1 Mixed gas measurement system

$$G = G_V = \rho_V Q_V \quad (3)$$

である。膨張補正係数 ε は以下の式で与えられる^{7)~9)}。

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\kappa \tau^{2/\kappa}}{\kappa-1}\right) \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 \tau^{2/\kappa}}\right) \left(\frac{1-\tau^{(\kappa-1)/\kappa}}{1-\tau}\right)} \quad (4)$$

ただし

$$\tau = (P_V - \Delta P_V) / P_V \quad (5)$$

つぎに、層流型流量計における質量流量は、つぎのとおりである。

$$G = G_L = n_L \frac{\pi d_L^3 (P_L^2 - P_a^2)}{256 \mu_L R T} \quad (6)$$

さて、二種のガスを混合するとき、ガスが化学反応をしないならば、各ガスのモル分率を x_1 , x_2 とすれば、

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (7)$$

が成り立つ。

混合ガスの密度はつぎの式で表わされる。

$$\rho_{\text{mix}} = x_1 \rho_1 + x_2 \rho_2 \quad (8)$$

つぎに、混合ガスの粘度に関しては、Sutherland¹⁰⁾ 以来多くの研究があるが、本論文では Wilke¹¹⁾ の近似式を用いる。これは、二種のガスを混合する場合、つぎのように表わされる。

$$\mu_{\text{Wilke}} = \frac{x_1 \mu_1}{x_1 + \phi_{12} x_2} + \frac{x_2 \mu_2}{x_2 + \phi_{21} x_1} \quad (9)$$

ただし、 $i, j=1, 2$ および $2, 1$ として

$$\phi_{ij} = \frac{[1 + \sqrt{\mu_i / \mu_j} (m_j / m_i)^{1/4}]^2}{\sqrt{8(1 + m_j / m_i)}} \quad (10)$$

である。

二種のガスの混合では G , x_1 , x_2 , ρ_V , μ が未知量である。(1)~(10)式に強い簡略化の仮定を設けて、これらを求めることは、前報¹⁾において試みた。本報告では、簡略化を排して、混合比推定精度の向上を図る。

3. 式のパラメータの決定

前章に記述した計算式に現われた諸量には、幾何学的量のほかに、実験的に求める必要がある流出係数、理論的に定まる膨張係数、Wilke の式と実測値との相違など、自明でない量が含まれている。本章では、これらの決定方法と、測定の結果を示す。文献1)ではベンチュリ管の係数 k_V を近似値 $k_V \approx (\pi/4) d_v^2$ として計算を行なった。しかし、(2)式に現われた ε と C は1ではないし定数でもない。これらがどのように変化するかを、まず調べ、次いで混合ガスの粘度推定式の検討を行なう。

3.1 ベンチュリ管の膨張係数 ε

膨張係数は(4)式に示したように、 β , τ , κ の関数であるから、これらにより ε の変化を数値的に示す。

まず、ベンチュリ管の入り口および出口の直径と接続管内径は等しく $D_v=14.0$ mm, スロート直径は $d_v=6.15$ mm である。よって、 $d_v/D_v=\beta \approx 0.439$ である。

つぎに本研究で用いるガスの比熱比は、ガスの組み合わせを総合すれば、最小値が1.3(三原子分子: CO_2)、最大値が1.67(単原子分子: アルゴン, ヘリウム)となる。混合気体の

場合には、混合比によって、比熱比が変わる。この変化は質量流量特性に影響を与える(前報^{1),2)}ではこの一連の関係を無視する単純化を行なった)。

比熱比の変化はAr-Heではほとんどないが、CO₂-Arの組み合わせでは変化が最大で、1.67から1.30までとなる。使用条件での圧力比は0.99程度であるから、膨張係数を1とみなす場合の誤差は、最大で0.6%に及ぶことがわかる。

3.2 ベンチュリ管の流出係数 C

つぎに流出係数は実験係数であって、レイノルズ数の関数になることがわかっている⁷⁻⁹⁾。実験に使用するガスを使って、ベンチュリ管におけるレイノルズ数と流出係数の関係をあらかじめ求めておく必要がある。実験はつぎのように行なった。

i) 各ガスごとに、湿式ガスメータ(株式会社シナガワ W-NK, 精度0.2%)を用いて、層流型流量計の校正を行なう。

ii) ベンチュリ管上流はバッファタンクでガスの温度を安定化し、サーボ弁により流量を定める。ベンチュリ管下流側に校正済みの層流流量計を接続して、流量を求め、同時にベンチュリ管の上流圧力 P_V と差圧 ΔP_V を測定する。

iii) (1), (2)式に測定した ΔP_V , Q を代入して C を求める。このとき、 $\rho_V = P_V / (RT_V)$ である。

こうして求めた流出係数 C の結果を Fig. 2 に示す。当てはめ曲線の式は、(11)~(13)式に示す。式のパラメータを求める計算は、最小二乗法によった。残差平方和の平均平方根(RMSE)を付記してある。

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi d_V \mu} = \frac{4G}{\pi d_V \mu} \quad (11)$$

$$340 < Re < 1700 \quad (\text{RMSE} = 0.00192)$$

$$C = \frac{0.9347 - 124.6/Re}{1 - 45.42/Re} \quad (12)$$

$$2480 < Re < 27600 \quad (\text{RMSE} = 0.003037)$$

$$C = \frac{1}{1 + 14.42Re^{-0.6025}} \quad (13)$$

流出係数はレイノルズ数が2000前後で特徴が変わるので、それぞれの範囲に当てはめ曲線を作成した。 $Re = 1700 \sim 2480$ の間はデータがないので、(12)式と(13)式の端を近似的に結び、流出係数は定数 $C = 0.885$ とした。

Fig. 2 Discharge coefficient of venturi meter

流出係数のデータが滑らかな1本の曲線で表わされないことの理由は、この程度のデータでは断言できない。しかし、一般的な推定は⁹⁾、流れが層流から乱流に移る遷移域が影響をもたらしているとするものである。

3.3 混合ガスの粘度

混合ガスの粘度が(9)式、(10)式で概算できることは知られているが、この式は近似式である。それゆえ、近似に由来する誤差を減らすことを考える。そのために、この区間において、混合ガスの粘度を測定し、実験値により、式の近似を減少させる補間式を作成する。

この作業のために、始めに実験により混合ガスの粘度を測定する。まず混合比を定めた流体を流して、層流型流量計に発生する差圧から、混合ガスの粘度を求める。この場合の実験装置の概略は Fig. 3 に示す。

Fig. 3 において、ガス1はタンク(Gas source 1)に貯留してあって、これに減圧弁1が接続され、その出力はバッファタンク1に接続してある。バッファタンク1は圧力、温度とともに安定化させる500 mLの等温化容器である。等温化容器から出るガス流量は、サーボ弁SVによる流量設定を行なう。

質量流量 G_1 , G_2 の測定を行なう FM1, FM2 は層流型流量計で、これらの混合前ガスの体積流量と圧力損失の関係を、湿式ガスメータを用いて校正をすませてある。なお、FM4 も同じ仕様仕様の層流型流量計である。またガスの温度を監視するために、3つの層流型流量計すべてに熱電対温度計が組み込んである。熱電対温度計の測定精度は ± 0.3 K である。

ガス1および2の流量は、層流型流量計 FM1 および FM2 の出力を A/D ボードを介して PC に取り込み、この値をサーボ弁にフィードバックして定値制御した。安定した測定を行なうために、バッファタンク圧力は 0.5 MPa とした。

この実験装置にはベンチュリ管も取り付けられているが、粘度測定では、ベンチュリ管からの圧力信号は使用しない。

Fig. 3 Experimental setup for viscosity measurement

FM4 で測定した体積流量と質量流量の関係は $Q=G/\rho_a$ である。これを用いると (6) 式の関係は以下になる。

$$\mu=\frac{2K_L}{Q}\left(1+\frac{\Delta P_L}{2P_a}\right)\Delta P_L \tag{14}$$

ただし、 K_L は

$$K_L=\frac{md_L^4n_L}{256L_L} \tag{15}$$

であるが、内径 d_L は必ずしも正確でないこともあるので、 K_L の値は、空気を用いた、湿式ガスメータによる校正により決定している。(14)式に、測定した差圧などを代入して求めた粘度を Wilke の式と比較する。Wilke の式は、成分ガスの粘度を既知として計算する内挿形の式である。すなわち $x_1=0, 1$ では、測定した粘度を用いるので、差は両端で 0 である。中間の x_1 に対する粘度の実験値と Wilke の近似式の値の関係を、

$$\mu=\mu_{Wilke}+x_1(1-x_1)(a_1+a_2x_1+a_3x_1^2) \tag{16}$$

と表わして、 a_1, a_2, a_3 を最小二乗法により求めることにより、Wilke 近似による誤差を減少させることができる。ただし、CO₂-Air および CO₂-Ar の場合は、 $a_3=0$ とする。

このようにして、実験値から最小二乗法により求めた補正式の係数は **Table 1** のようになる。Table 1 には実験値と (9) 式で求めた値の差の平均二乗誤差 (RMSEW) と、実験値と (16) 式で求めた値との差の平均二乗誤差 (RMSEC) も記してある。また、分子量の大きいほうをガス 1 として、混合比を横軸に、Wilke の式と実験値の差を縦軸にとって、**Fig. 4** に示す。

RMSEW は、Wilke の式の近似誤差が含まれているが、RMSEC は、それを補間式により打ち消した後の誤差であるから、これは実験誤差によると考えることができる。ここでは、RMSEC/RMSEW は、大きい場合で約 6% となっている。粘度の値は、 $1.4\sim2.3\times10^{-5}$ Pa.s のオーダーであるのに対して RMSEW は 4×10^{-7} Pa.s のオーダーであるから Wilke の式の近似誤差は 2% 程度であることがわかる。

また、本研究では空気を単一気体として、他の気体との混合した場合を考察してきた。ところが、空気は周知のように複数のガスの混合物である。そこで、Wilke⁽¹⁾ の式を用いて、空気を多成分 (N₂, O₂, Ar, CO₂) として混合ガス粘度を計算した値と空気を純物質のように扱って計算した混合ガス粘度 (これには空気の実測値を使う) を比較する必要がある。結果を比較すると、誤差は最大で 0.12% 程度であり、この差は Wilke の式で空気粘度を求めた値と実測値の差によるものである。したがって、空気を純粋物質のように扱うことにより発生する誤差は、空気粘度測定の観測値誤差よりも小さい。その詳細な結果は付録に示す。

4. 混合比と流量の推定

本研究の課題は混合ガスを流して、2 つの直列接続したベンチュリ管 (FM3) と層流型流量計 (FM4) に生じる圧力降下を測定し、それらの値から、混合比と流量の同時推定を

Table 1 Property of interpolation

Gas mixture	CO ₂ -Air	CO ₂ -Ar	Ar-He
a_1	1.36E-06	2.80E-06	-7.07E-06
a_2	-5.29E-07	-2.69E-07	2.55E-05
a_3	0	0	-2.01E-05
RMSE W	1.83E-07	4.49E-07	2.21E-07
RMSE C	5.02E-09	2.84E-08	5.29E-08
RMSEC/ RMSEW	2.75E-02	6.33E-02	2.39E-01

Fig. 4 Difference between Wilke's formula and experiment

行なうことである。これを行なうために、混合ガスを流して、流量計で観測される差圧、絶対圧を測定する。しかる後に、混合比と流量の推定計算を行ない、推定法の誤差評価を行なう。したがって、実験装置は 3 章に述べたものでよいが、ここではベンチュリ管における圧力、差圧データも使用しなければならない。

4.1 計算方法

FM3, FM4 で観測する圧力と差圧から、 G と x_1 を計算する。(3) 式と (6) 式で求める質量流量が等しくなる x_1 を求めるのであるが、 $0\leq x_1\leq 1$ であるから、二分法を適用して、 G_L-G_V の大きさには注意を払わず、単純に 16 回繰り返し計算を行なった。これで x_1 は 10^{-4} と以下まで正しく計算できる。

G_V の計算には、 C, Re を決定するための繰り返し計算を行なう。 C と Re の関係式は、(11) 式と (1), (2), (3) 式から、

$$Re-\frac{\pi d_V}{4\mu_V}\frac{\varepsilon\sqrt{2\Delta P_V\rho_V}}{\sqrt{1-\beta^4}}C=0 \tag{17}$$

である。この C に Re に応じて (12) 式、(13) 式のどれかを代入して、解を求める。繰り返し計算では、単純に繰り返し代入法を用いた。これは方程式 (12), (13) 式の性質がこの方法に適合しているからで、繰り返しは数回で収束している。

4.2 実験および推定計算の結果

実験を行なったガスの組み合わせ、(1) 二酸化炭素と空気、(2) 二酸化炭素とアルゴン、(3) アルゴンとヘリウム、の三通りについて、以下に結果を示す。

実験を行なう混合ガスの予定流量を 0.5 L/s, 0.75 L/s, 1.0 L/s の三通りとして、それぞれの流量につきガス 1 の割合を、約 0.1 ずつ変えて実験を行なった。ガス 1 のモル分率

Fig. 5 Mole fraction of CO₂ (x_1) and Air mixture

Fig. 6 Mole fraction of CO₂ (x_1) and Argon mixture

Fig. 7 Mole fraction of Argon (x_1) and Helium mixture
の測定値を横軸，ガス 1 のモル分率を縦軸にした線図を
Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に示す。

この実験における測定項目は，流量計 FM1, FM2 による流量(差圧から算出)，ベンチュリ管(FM3)における差圧と入り口圧力，層流型流量計(FM4)における差圧と入り口圧力である。これらのほかに実験条件の監視用にガス 1, 2 の温度，層流型流量計の温度を，圧力などと同時に観測記録してある。ガス 1, 2 の流量，温度が安定した定常値になってから，測定値記録をする。この装置の過渡現象は 1 秒程度であるから，起動後数秒で安定する。混合比率と流量の計算に用いる測定値は，装置起動のおおむね 9 秒後の 1 秒間から 10 ms 跳びに測定記録した 100 の個のデータの平均値である。

(18)式では x_1 (direct) を $x_{1,d}$, x_1 (estimate) を $x_{1,est}$ と書く。これらはいずれも測定値から求めた量であり，これらの量の差の平方平均を求める。すなわち

Table 2 Mixture estimate error

Mixture	CO ₂ -Air	CO ₂ -Ar	Ar-He
E_x	0.018	0.051	0.018

Table 3 Relative error of flow estimate

Mixture	CO ₂ -Air	CO ₂ -Ar	Ar-He
RMSE(E_G)	0.012	0.016	0.012

$$E_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{1,d} - x_{1,est})^2_k} \quad (18)$$

(k : 測定点番号, N : 測定点数)

として，ガスの各組み合わせについて計算した結果を Table 2 に示す。Table 2 に示したように，CO₂-Ar における濃度推定の総合誤差は，5%程度，他のガスの場合では 2%未満である。

つぎにこのシステムでは流量も同時に推定している。ベンチュリ管と層流型流量計システムから求める質量流量を， G_{est} とし，FM1 と FM2 で検出した質量流量 G_1 , G_2 を基準とすれば，推定の相対誤差 E_G は

$$E_G = \frac{G_{est}}{G_1 + G_2} - 1 \quad (19)$$

である。 E_G も計測点ごとに異なった値を得るから，その RMSE を Table 3 に示す。その場合の RMSE は 2%を超えていない。

5. ま と め

本研究では，ベンチュリ流量計と層流型流量計からなる混合比率測定システムの特性を精査するために，解析と実験を行なった。まず，使用するベンチュリ管の流出係数を求めた。また，Wilke の混合ガス粘度計算式に対する補正式を作った。つぎに混合ガスが流れたときに，直列接続した層流型流量計とベンチュリ管に生じるそれぞれの圧力差から，流量と混合のモル分率を計算する手順を確立した。最後に，モル分率と流量を求める計算の有効性を実験により確かめた。

以上すべての知見を総合して，著者らは，広い範囲のガスの組み合わせに対して，流量については 2%以内，混合のモル分率についても 5%程度で推定でき，屋外などの現場での使用に利用できるものと考えている。

参 考 文 献

- 1) S. Yamazaki, T. Funaki, K. Kawashima and T. Kagawa: A concentration measurement system for binary gas mixtures using two flowmeters, Measurement Science and Technology, **18**, 2762/2768 (2007)
- 2) 荒川, 香川, 竹内, 六嘉, 染谷: 管路内での異種ガス混合に関する考察, 日本シミュレーション学会, **26-4**, 198/204 (2007)
- 3) 高橋, 佐々木: アドバンスセンサハンドブック, 培風館 (1994)
- 4) 谷口, 村上, 村重, 小林, 田中: PLTZ 光シャットを用いた赤外線吸収方式 C2 ガスセンサの製作および特性, 電子情報通信学会論文誌 C-II, **81-8**, 727/734 (1998)
- 5) J. C. Vyas, V. R. Katti, S. K. Gupta and J. V. Yakhmi: A non-invasive ultrasonic gas sensor for binary gas mixtures, Sensors and Actuators, **B115**, 28/32 (2006)

- 6) 船木, 川嶋, 香川: 高速応答性を有する気体用層流型流量計の特性解析, 計測自動制御学会論文集, **40**-10, 1008/1013 (2004)
- 7) JIS Z 8762-4: 2007, 円形管路の絞り機構による流量測定方法, 4部: 円すい形ベンチュリ管 (2007)
- 8) 工業計測技術大系編集委員会: 工業計測技術大系-2, 流量(上), 日刊工業新聞社 (1964)
- 9) W. R. Miller: Flow Measurement Engineering Handbook, McGraw-Hill (1983)
- 10) W. Sutherland: The Viscosity of Mixed Gases, Philosophical Magazine, Fifth Series, **40**, 421/431 (1895)
- 11) C. R. Wilke: A Viscosity Equation for Gas Mixtures, Journal of Chemical Physics, **18**-4, 517/519 (1950)

《付 録》

A. 空気が混合ガスであることの影響

ここで扱った混合は、二種類のガスの混合であるが、その中には空気も1つのガスとして扱っている。ところが、空気は周知のように複数のガスの混合物である。これを純物質に対するガス混合の式に使うということが正当であるかという疑問がある。たとえば Wilke は n 種のガスに対しても、二種の場合と同じ式が成り立つとしている。すなわち、 n 種のガスの混合では

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n \varphi_{ij} x_j}$$

である。この式は重複回数の使用で、結果が同じにならない。すなわち、三種を混合するとき、まず二種を混合し、それを純物質のように扱って三番目のガスと混合したときの粘度と、上の式で $n=3$ として計算した結果とでは、式の上では等しくならない。しかし、数値的に重要な差を生じるかどうかは、個々のガスごとに異なった結論になる。目下の問題では、空気と他のガス、すなわち、アルゴンや二酸化炭素との組み合わせではどうかという点を数値的に検討する必要がある。

まず空気の成分は、詳細になると、測定地により、また文献により差異があるけれども、概略値は共通で、 N_2 が 78%, O_2 が 21%, Ar が 0.9% で残りは微量成分 (CO_2 は 0.033%) である。成分比と粘度について、文献 10), 11) の値を使って、 $n=4$ (N_2, O_2, Ar, CO_2) として、この式で空気の粘度を計算すると (ただし数値計算では成分比を有効数字 4 桁までとる。また、温度は 20°C), $\mu = 1.816 \times 10^{-5}$ Pa.s, となるが、空気粘度の測定値は 18.2×10^{-5} Pa.s 程度であるから、ほぼ一致する。

つぎに他のガスを含めて $n=5$ として上記の式により計算した値を μ_{multi} 、空気を純物質のように使って計算した混合ガス粘度を μ_{single} と表わして (これには空気の実測値を使う)、両者を比較したグラフを Fig. A. 1 に示す。

横軸は空気の分率で、空気 100% のときに両者が一致しないで、0.12% 程度異なるのは、Wilke の式で空気粘度を求めた値と実測値の差によるものである。この計算結果を参照して、本文中では、空気を純物質であるかのように扱って、粘度計算を行なった。図からわかるように、最大の差は中間

Fig. A. 1 Errors due to assuming air as a pure material

の混合比においてではなく、空気そのもののときに生じるのである。したがって、空気を純物質として扱うことにより発生する誤差は、空気粘度測定の観測値誤差よりも小さい。

[著 者 紹 介]

尹 鍾 皓 (正会員)

2005 年東京工業大学大学院精密機械システム専攻博士課程修了。同年ボッシュ(株)入社。2007 年東京工業大学精密工学研究所高機能化システム助教、現在に至る。圧縮性流体の計測と制御の研究に従事。博士(工学)。日本フルードパワーシステム学会、日本シミュレーション学会の会員。

向 後 晃

2008 年上智大学機械工科学士課程卒業。2009 年東京工業大学大学院総合理工学研究科メカノマイクロ工学専攻修士課程修了。現在、ソニー株式会社社員。

川 嶋 健 嗣 (正会員)

1992 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。97 年同大学院理工学研究科制御工学専攻博士後期課程修了。同年東京都立工業高等専門学校機械工学科助手、2000 年東京工業大学精密工学研究所助教授、現在、同大学准教授。博士(工学)。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。

香 川 利 春 (正会員)

1974 年東京工業大学制御工学科卒業。同年北辰電機製作所入社。76 年東京工業大学助手、講師、助教授を経て、現在、精密工学研究所教授。圧縮性流体システム、流体計測、生体計測に関する研究に従事。工学博士。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、日本シミュレーション学会などの会員。