定積槽方式により測定されたソニックベンチュリノズル流出係数の 不確かさ評価[†]

石橋 雅裕*・植木 正明*・高本 正樹*
渡辺 紀之*・早川 洋平**・荒石 潔**

Estimation of the Uncertainty of Discharge Coefficients of Sonic Venturi Nozzles Measured by the Constant Volume Tank Method

Masahiro ISHIBASHI*, Masaaki UEKI*, Masaki TAKAMOTO*,
Noriyuki WATANABE*, Youhei HAYAKAWA** and Kiyoshi ARAISHI**

The paper estimates the uncertainty of discharge coefficients of sonic Venturi nozzles, which have toroidal throats complying with ISO 9300, measured at the atmospheric pressure by a constant volume tank system developed as the gas flow primary standard in Japan. Total uncertainties of the coefficients at 95% confidence level are estimated at 0.14% and 0.05%, for the smallest nozzle of Reynolds number of 0.5×10^5 and for the largest one of 2.5×10^5 , respectively. More than half of the uncertainty of the smallest nozzle is caused by diameter measurement. Total uncertainty of mass flow rate, which is independent of the diameter measurement, is estimated at less than 0.05% for all nozzles.

Key Words: gas flow standard, constant volume tank method, sonic Venturi nozzle, uncertainty analysis

1. はじめに

計量研究所では、我国における気体流量標準体系を整備するために、昭和63年度より定積槽方式による第一次国家標準の設定、および、その標準を効率よく産業界に普及するための研究を行っている。その第一段階における成果として定積槽システムの大部分が完成し、 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下のソニックベンチュリノズル(以下、音速ノズルという)を介して大気圧状態の高精度流量標準の供給が可能となった。

筆者らは、このシステムを用いてISO 9300¹⁾型トロイダルスロート音速ノズルの流出係数を大気圧状態で測定

し、ISOの値とISOの不確かさの範囲内で一致すること、および本システムのばらつきは十分に小さいことを報告した²⁾。

今後の我国における気体流量の標準は、これらシステムにより校正された音速ノズルを介して供給されるため、その不確かさは充分詳細に評価されている必要がある。本論文では、初めに流出係数の測定原理を示し、測定値に起因する不確かさの解析を容易にするために流出係数を互いに独立な5変数に分解する。つぎに、文献から引用される物性値に関し、その文献に示される不確かさなどを用いて物性値に起因する流出係数の不確かさの概算値を評価する。つぎに、流出係数の独立な5変数に関し、測定値に起因する不確かさを個別に評価する。最後にそれらの不確かさを合成し、測定値に起因する流出係数の不確かさを求める。

2. 測定原理

音速ノズルの流出係数 C_d は、臨界流量の理論値 q_{the} と実測値 q_{mea} の比で定義される^{1),3)}。

[†] 第8回流体計測シンポジウムで発表(1991・1)

* 計量研究所力学部 つくば市梅園 1-1-4

** 日本科学工業(株)開発部 吹田市清水 2-1

* Mechanical Metrology Department, National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba

** Research and Development Department, Nihon Kagaku Kogyo Co., Ltd., Suita
(Received January 29, 1992)

(Revised June 22, 1992)

$$C_d = \frac{q_{\text{mea}}}{q_{\text{the}}} \quad (1)$$

流量の理論値は、理想気体の一次元等エントロピー変化を仮定し、次式で計算する。

$$q_{\text{the}} = A \cdot C_{\text{crt}} \cdot P_s \cdot (R \cdot T_s \cdot N_a)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{mol/s}) \quad (2)$$

流量の実測値は、減圧した定積槽内にノズルをとおして大気を吸入し、吸入前後における槽内圧力、温度および吸入時間を用いて次式で計算する。

$$q_{\text{mea}} = \frac{M}{t_s} \quad (\text{mol/s}) \quad (3)$$

$$M = \frac{V}{R} \cdot \left(\frac{P_1}{Z_1 \cdot T_1} - \frac{P_0}{Z_0 \cdot T_0} \right) \quad (\text{mol}) \quad (4)$$

$$C_{\text{crt}} = \left[\gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ここで、 A , P , T , Z , V , M , t_s , R , N_a , γ , および C_{crt} は、それぞれ、ノズルのスロート面積、圧力、温度、圧縮係数、定積槽の容積、定積槽内に吸入された空気のエントモル数、吸入時間、気体定数、空気のエントモ質量、空気の比熱比、および理想気体の一次元等エントロピー臨界定数を表わす。また、添字 0, 1, および s は、それぞれ、大気吸入前、後における槽内の値、および吸入大気のエントモ点における値であることを示す。

定積槽の容積 V は、減圧した定積槽内に高純度窒素ガスを吸入し、吸入前後における槽内圧力、温度およびガスポンベの質量を測定し、次式で計算する³⁾。

$$V = \frac{R}{N_n} \cdot \frac{m_0 - m_1}{\frac{P_{1v}}{Z_{1v} \cdot T_{1v}} - \frac{P_{0v}}{Z_{0v} \cdot T_{0v}}} \quad (6)$$

ここで、 m および N_n は、それぞれ、窒素ガスポンベの質量および窒素のエントモ質量を表わす。また、添字 1 および 2 は、それぞれ、ガスの吸入前および後における値であることを表わし、第 2 の添字 V は容積測定時の値であることを表わす。

3. 流出係数の独立な変数

流出係数の誤差要因およびそれらの不確かさ²⁾を Table 1 に示す。測定値に起因する不確かさの解析を容易にするために、流出係数 C_d をつぎの五つの独立変数に分解する。

- ① 容積 V
- ② エントモ数と容積の比

$$M' = \frac{M}{V} \quad (\text{mol/m}^3) \quad (7)$$

- ③ 吸入時間 t_s
- ④ ノズルスロート直径 D
- ⑤ エントモ流量理論値とスロート面積の比

$$q' = \frac{q_{\text{the}}}{\pi \cdot (D/2)^2} \quad (\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}) \quad (8)$$

これらの変数は互いに共通な測定値を含まないため、95%の信頼度における流出係数の不確かさは、それぞれの変数に関して独立に評価された不確かさに感度係数をかけ、自乗和の根を取るにより得られる^{4),5)}。このとき流出係数 C_d およびその不確かさ U_{C_d} は次式で与えられる。

$$C_d = \frac{4 \cdot V \cdot M'}{t_s \cdot \pi \cdot D^2 \cdot q'} \quad (9)$$

$$\left(\frac{U_{C_d}}{C_d} \right)^2 = \left(\frac{U_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{U_{M'}}{M'} \right)^2 + \left(\frac{U_{t_s}}{t_s} \right)^2 + \left(2 \cdot \frac{U_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{U_{q'}}{q'} \right)^2 \quad (10)$$

ここで U は、添字の表わす測定値の不確かさを表わす。

4. 定数による不確かさ

流出係数の計算に用いられる定数には、Table 1(c) に示すように、気体定数 R 、窒素および大気のビリアル定数 (B_N および B_a)、ノズルおよび定積槽の熱膨張率 α 、窒素、乾燥空気および飽和水蒸気のエントモ質量 (N_n , N_0 および N_w)、および乾燥空気と飽和水蒸気の定圧比熱と比熱比 (C_{pa} , C_{pw} と γ_a , γ_w) がある。これらの定数がもたらす流出係数の不確かさを推定するために、本章では、文献に示される各定数の不確かさ、各種文献間の差、または安全を見積った推定値を要素不確かさとし、流出係数に伝播する不確かさを計算する。このとき、計算が煩雑になることを避けるため、 N_0 および N_w の不確かさを大気のエントモ質量 N_a の不確かさにまとめ、同様に、各定圧比熱と比熱比の不確かさを大気の比熱 γ の不確かさにまとめた後、流出係数の不確かさを計算する。

4.1 気体定数 R による不確かさ ϵ_R

気体定数 R は、 q' , V , および M' に含まれるが、 M' および V に含まれる R は C_d を計算する際に互いに打ち消し合うため、 q' に含まれるものだけが C_d に不確かさをもたらす。 R は 1/2 乗された係数として q' に含まれるため、その不確かさは 1/2 倍されて C_d に伝播する。気体定数 R の相対不確かさとして文献 6) に示される 0.00084% を用いると、気体定数による流出係数の不確かさ ϵ_R はつぎの値となる。

$$\epsilon_R = 0.0004\% \quad (11)$$

4.2 ビリアル定数による不確かさ ϵ_B

窒素および空気のビリアル定数 B の不確かさは、圧縮係数 Z を介し、それぞれ、容積 V および M' に不確かさをもたらす。本測定では定積槽内は常温で必ず 70 kPa 以下であったため、 Z に対する B の感度係数 ($\partial Z / \partial B$) の最大値は 28.1 mol/m³ である。ビリアル係数の不確かさを文献 7) と 8) の差の最大値である 5×10^{-7} (m³/mol) とすると、ビリアル定数が各圧縮係数にもたらす不確か

Table 1 Error sources of a discharge coefficient measurement
(a) Significant sources related to measurements

Classification	Source	Uncertainty		Notes
		Systematic	Random	
V	m_0	0.0001 kg	0.001kg	
	m_1	0.0001 kg	0.001kg	
	$P_{1V}-P_{0V}$	4.2 Pa	1 Pa	
	T_{1V}	0.05°K	0.003°K	
M'	P_1-P_0	4.2Pa	1Pa	0.026 mol/h at the pressure difference of 101 kPa.
	T_0	0.05°K	0.003°K	
	T_1	0.05°K	0.003°K	
	leakage	(see Note)	0	
t_s	t_s	0.001% 0.001%	0.0015 s 0.014 s	quick valve normal valve
D	D	3 μ m	0	
q'	P_s	7 Pa	5 Pa	
	T_s	0.05°K	0.1°K	
	H_s	2% of rdg.	0	

(b) Insignificant error sources related to measurements

Classification	Source	Uncertainty		Sensitivity
		Systematic	Random	
V	P_{0V} T_{0V}	100 Pa 0.05°C	1 0.003	proportional to $(1/T_{1V}-1/T_{0V})<6\times 10^{-5}$ $P_{0V}/P_{1V}<2\times 10^{-3}$ times larger than that of T_{1V}
M'	P_0	100 Pa	1	proportional to $(1/T_1-1/T_0)<6\times 10^{-5}$
D	Temperature	5°C	1°C	proportional to $\alpha=1.64\times 10^{-5}$

(c) Error sources related to physical quantities

Classification	Source	Typical value	Uncertainty	Notes on the uncertainty
V	R	8.31451 J/°K·mol	0	Eliminated by the R in M'
	N_a	0.0280135 kg/mol	0.0001% (ignored)	From error of atomic weights(Ref. 7)
	purity	99.9995%		
	B_a	-10^{-5} m ³ /mol	$5\cdot 10^{-7}$ m ³ /mol (ignored)	Difference between Ref. 7 and 8
	α	10^{-5}		A correction by α is less than 0.01 %
M'	R	8.31451 J/°K·mol	0	Eliminated by the R in V
	B_a	-10^{-5} m ³ /mol	10^{-6} m ³ /mol	An assumed value
D	α	10^{-5}	(ignored)	A correction by α is less than 0.01 %
q'	γ_{air}	1.402	0.001	An assumed value
	γ_{wet}	1.332	0.001	An assumed value
	C_{pa}	1.007 J/°K·kg	0.001 J/°K·kg	An assumed value
	C_{pw}	1.890 J/°K·kg	0.001 J/°K·kg	An assumed value
	R	8.31451 J/°K·mol	0.0084 %	From Ref. 6
	B_a	-10^{-5} m ³ /mol	$5\cdot 10^{-7}$ m ³ /mol	Difference between Ref. 7 and 8
	N_0	0.0289635 kg/mol	0.002 %	From error of atomic weights(Ref. 7)
	content		0.005 %	Maximum difference between Ref. 7, 8, 9, and 10
	f	1	0.0005	An assumed value
	P_{sv}	3000 Pa	25Pa	An assumed value
	N_{H20}	18.015 kg/mol	0.004 %	From error of atomic weights(Ref. 7)

さ U_z は最大で 1.4×10^{-5} となる。

各圧縮係数の相対不確かさは、それぞれ比例係数 $P/\Delta P$ で流出係数に伝播する。ここで P および ΔP は、圧縮係数が計算される圧力および吸入差圧を表わす。容積測定時には $P_0 < P_1/500$ としたため、 Z_{0V} および Z_{1V} の感度係数はそれぞれ 1.0 および 0.0 となる。流出係数測定時における最大圧および最小差圧は、それぞれ 70 kPa

および 16 kPa であるため、感度係数の最大値はそれぞれ 4.4 および 3.4 となる。したがって、全てのビリアル係数による流出係数の不確かさ ϵ_B は、最大でつぎの値となる。

$$\epsilon_B = (1.0^2 + 4.4^2 + 3.4^2)^{0.5} \cdot U_z \cdot 100 < 0.008\% \quad (12)$$

4.3 空気のモル質量 N_a による不確かさ ϵ_{Na}

N_a は次式(13)で計算され、その値は N_2 , O_2 , Ar , CO_2 ,

H₂O のモル質量とその含有率 x_v および飽和蒸気圧 P_{sv} によりほぼ決まる⁸⁾。

$$N_a = (1 - x_v) \cdot N_0 + x_v \cdot N_w \quad (\text{kg/mol}) \quad (13)$$

$$x_v = \frac{H_s}{100} \cdot f \cdot \frac{P_{sv}}{P_s} \quad (14)$$

ここで、 N_0 , N_w , f , および H_s は、それぞれ、乾燥空気と飽和水蒸気のモル質量、分圧係数、および相対湿度(%)である。

大気に含まれる原子の原子量の不確かさ⁷⁾からもたらされる N_0 および N_w の不確かさは、各不確かさに含有率に等しい感度係数をかけて自乗和の根を取り、それぞれ 3.3×10^{-7} および 7.1×10^{-7} (kg/mol) と評価される。これらは N_a に対し、 3.3×10^{-7} および 1.4×10^{-8} (kg/mol) の不確かさをもたらす。

CO₂ および H₂O 以外の成分の含有率は地球上でほぼ不変^{9),10)} である。CO₂ の含有率は 0.03% 前後であるため、その変化による不確かさは充分小さいものとして無視する。含有率に起因する不確かさは、各種文献⁷⁻¹⁰⁾ に示される含有率から計算したモル質量の差の最大値である 2×10^{-6} (kg/mol) とする。

前報²⁾ に示した流出係数測定時における分圧係数 f および飽和蒸気圧 P_{sv} の値は、それぞれ 1.0040~1.0043 および 2340~3780 Pa の範囲に入った。それらの誤差を安全に見積り、それぞれ 0.0005 および 25 Pa とし、湿度を平均的な値である 50% として感度係数を計算し、それらが N_a にもたらす不確かさを求めると、それぞれ 1.09×10^{-7} および 1.97×10^{-6} (kg/mol) となる。

以上の要素不確かさを自乗和の根で合成すると、 N_a の不確かさ U_{Na} は含有率と飽和水蒸気圧の不確かさに支配され、つぎの値となる。

$$U_{Na} = 0.01\% \quad (15)$$

U_{Na} は、 q' を介して C_d に不確かさをもたらす。 N_a は q' に 1/2 乗された係数として含まれるため、 U_{Na} は 1/2 倍されて C_d に伝播し、 N_a に含まれる定数の不確かさがもたらす C_d の不確かさ ϵ_{Na} はつぎの値となる。

$$\epsilon_{Na} = 0.005\% \quad (16)$$

4.4 窒素のモル質量 N_n による不確かさ ϵ_{Nn}

容積測定の際に用いられる高純度窒素ガスのモル質量の不確かさは、 V を介して C_d に不確かさをもたらす。モル質量の不確かさは、原子量の不確かさ (0.0001%) および用いられたガスの純度 (99.9995%) によりもたらされたが、本解析では充分に小さいとして無視する。

4.5 空気の比熱比 γ による不確かさ ϵ_γ

C_d に対する γ の感度係数 ($\partial C_d / \partial \gamma$) は 0.169 となり、 γ の不確かさは約 0.17 倍されて C_d に伝播する。

大気の比熱比 γ の値は、常圧常温の乾燥空気の定圧比

熱 C_{pa} と比熱比 γ_a , および、飽和水蒸気の定圧比熱 C_{pw} と比熱比 γ_w を用い、次式で計算した²⁾。

$$\gamma = \frac{(1 - x_v) \cdot C_{pa} + x_v \cdot C_{pw}}{(1 - x_v) \cdot \frac{C_{pa}}{\gamma_a} + x_v \cdot \frac{C_{pw}}{\gamma_w}} \quad (17)$$

右辺に含まれる各比熱および比熱比の誤差をほぼ 0.1% である 0.001 (kJ/°K·kg および無次元) とし、また、 x_v に含まれる定数による x_v の誤差 3×10^{-5} を計算に入れ、それぞれの感度係数をかけて自乗和の根で求めた γ の誤差は 9.81×10^{-4} となる。

以上より、 γ に含まれる定数による流出係数の不確かさ ϵ_γ は、つぎの値となる。

$$\epsilon_\gamma = \frac{9.81 \cdot 10^{-4} \times 0.169}{\gamma} \cdot 100 = 0.02\% \quad (1)$$

4.6 熱膨張率 α による不確かさ ϵ_α

定積槽の容積およびノズルスロート面積の温度変化による補正は 0.03% 以下であるため、 α の誤差による不確かさは充分に小さいとして無視する。

4.7 全ての定数がもたらす不確かさ

以上で評価された全ての定数が流出係数にもたらす不確かさは、ほぼ γ の不確かさに支配され、95% の信頼度において 0.02% と評価される。

5. 測定値がもたらす各独立変数の不確かさ

本章では、2 章で論じた独立変数のうち、 D を除いた 4 変数について測定値がもたらす不確かさをおのおの評価する。また、定積槽の漏れにより生ずる M' の不確かさも評価する。スロート直径 D の不確かさは、測定に用いた 3 次元形状測定器の総合不確かさ $\pm 3 \mu\text{m}$ に等しいため、本章では述べない。

測定値がもたらす不確かさは、測定装置および吸入気体が限定された場合でも、ノズル直径、吸入時間、および槽内圧力に依存する。本章では、Table 2 に示す代表的な測定条件の中で、 A , A' , E , および F に関する不確かさを評価する。流量が最大である 200 m³/h ノズルでは、吸入時間が短くパルプの動作時間の影響が最も大きく出るため、高速パルプ (切り換え時間 0.02 s) および通常パルプ (同 0.3 s) を用いた場合の不確かさを評価する (それぞれ測定 A および A')。流量が最小である 12.5 m³/h ノズルでは、吸入時間の制限²⁾ (約 10 分) のため吸入差圧が約 16 kPa に制限され、不確かさが槽内圧力に依存する。Table 2 に示されるそのほかの測定例の不確かさは、以下と同様に評価された。

5.1 V の不確かさ

高純度窒素ガスを用いる容積測定の重要な誤差要因は、窒素ガス吸入前後におけるガスポンベの質量 (m_0) お

Table 2 Typical measuring conditions

Name	A	A'	B	C	D	E	F
Actual flow (m ³ /h)	200	200	100	50	25	12.5	12.5
Valve	Quick	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Suction time (s)	144	144	289	574	596	600	597
Waiting time (s) after a suction	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
Initial condition in the CVT	$T_0(^{\circ}\text{K})$	296.0	296.0	296.0	296.0	296.0	296.0
	$P_0(\text{kPa})$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	44.2
Final condition in the CVT	$T_1(^{\circ}\text{K})$	296.5	296.5	296.5	296.5	296.5	296.5
	$P_1(\text{kPa})$	61.0	61.0	61.0	61.0	32.0	16.9
Estimated uncertainty	Systematic(%)	0.046	0.046	0.056	0.071	0.097	0.136
	Random(%)	0.016	0.019	0.017	0.016	0.016	0.017
	Total(%)	0.048	0.049	0.058	0.073	0.098	0.155

Table 3 Estimation of the uncertainty of $V(\text{m}^3)$

Source	Typical value	Uncertainty of source		Absolute value of sensitivity	Uncertainty(L) in V	
		Systematic	Random		Systematic	Random
m_0	65.00 kg	0.1 g	1 g	1.76 m ³ /kg	0.18	1.76
m_1	57.42 kg	0.1 kg	1 g	1.76 m ³ /kg	0.18	1.76
ΔP_V	4.99 kPa	4.2 Pa	1 Pa	0.27 m ³ /kPa	1.13	0.27
T_{1V}	296.5 ^o K	0.05 ^o K	0.1 ^o K	0.045 m ³ / ^o K	2.26	0.14
V	13.37 m ³					
Total					2.54 / = 0.019%	2.51 / = 0.019%

Table 4 Results of volume measurements

Measurement No.	Result(m ³)
1	13.3683
2	13.3653
3	13.3639
4	13.3681
5	13.3687
6	13.3704
7	13.3672
8	13.3672
9	13.3673
Average	13.3674
Additional volume (valve)	0.0005
Total volume	13.3679
Reference temperature	26 ^o C
Standard deviation	0.0019
Degree of freedom	8
Student's t	2.306
Random uncertainty of a measurement	0.0044
Random uncertainty of the average	0.0015
Estimated systematic uncertainty	0.0025
Total uncertainty	0.0029 (= 0.022%)

および m_1), 槽内の圧力変化 $\Delta P_V = P_{1V} - P_{0V}$, 槽内最終温度 T_{1V} である. 温度の感度係数は圧力に比例し, 実際に行われた測定では槽内初期圧力 P_{0V} を P_{1V} の 1/500 倍以下としたため, T_{0V} のもたらす不確かさは T_{1V} のものに比べて無視しえる.

(6)式より求めた誤差要因の感度係数と要素不確かさ, 容積値に伝播する不確かさを Table 3 に示す. その

系統, 偶然, および総合不確かさは, それぞれ 0.02%, 0.02%, および 0.03% と評価された.

Table 4 は, 実際に行われた 9 回の容積測定の結果である. 自由度とスチューデントの t を用い, 標準偏差から計算した容積測定の偶然不確かさは, 0.03% となり, 先の評価値とほぼ一致した. 容積 V の値として表に示した 9 回の測定の平均値を用いれば, その偶然不確かさは測定値のその $1/\sqrt{9}$ 倍 = 0.01% となる. したがって, 平均値の総合不確かさは, 系統不確かさの評価値 (= 0.02%) と自乗和の根で合成することにより, $\pm 0.02\%$ となる. 流出係数 C_d を求める際に容積 V は定数として扱われるため, この総合不確かさが C_d の要素系統不確かさとして扱われる. 容積による C_d の偶然不確かさは, 定積槽の温度・圧力などによって生じうるが, 4.6 節に述べた理由およびつぎに述べる測定結果より無視しえることがわかる.

槽内圧力による容積変化の影響を調べるために, 1 本のノズル (100 m³/h) について, 吸入時間を短くして槽内最終圧力 P_1 を変化させ, 流出係数 C_d を測定した結果を P_1 の関数として Fig. 1 に示す. ここで, 流出係数を計算するために用いられる容積の値は, Table 4 に示される平均値とした. Fig. 1 には, 吸入時間を約 240~340 秒とした全吸入 (吸入差圧 70 kPa), および, 40 秒 (同 9 kPa) 以上 70 秒 (同 16 kPa) 以下とした分割吸入²⁾ で測定された流出係数が示されている. たとえば 40 秒の分割吸入で

Fig. 1 Discharge coefficient of a sonic Venturi nozzle (100 m³/h) measured at various pressure range in the constant volume tank using the quick valve

Fig. 2 Discharge coefficients of a sonic Venturi nozzle (200 m³/h) measured with various suction time

Table 5 Estimation of the uncertainty of M' (mol/m³)

Source	Name of measurement	Typical Value	Uncertainty of source		Absolute value of sensitivity	Propagated uncertainty (μmol/m³)	
			Systematic	Random		Systematic	Random
ΔP	A E, F	60 kPa 15.9 kPa	4.2 Pa	1 Pa	0.41 mol/m³·kPa	1704	406
T_0	A, E F	296.0°K	0.05°K	0.003°K	0.0014 mol/m³·°K	69	4
		296.0°K			0.0606 mol/m³·°K	3030	182
T_1	A	296.5°K	0.05°K	0.003°K	0.0834 mol/m³·°K	4173	250
	E	296.5°K			0.0231 mol/m³·°K	1153	69
	F	296.5°K			0.0821 mol/m³·°K	4104	246
M'	A E, F	23.34 mol/m³				A) 4508	477
		6.40 mol/m³				= 0.019%	= 0.002%
Total						E) 2058	412
						= 0.032%	= 0.006%
						F) 5379	508
						= 0.084%	= 0.008%

は、最終圧力が $P_1 = 9 \times n$ ($n = 1, 2, \dots, 8$) kPa となる 8 回の測定が行われた。容積は槽内圧力が低いほど小さくなるが、流出係数は容積値に比例するため、槽内圧力による容積変化があれば、容積値を定数として求めた流出係数は、 P_1 の増加と共に小さくなるはずである。Fig. 1 では、 C_d は P_1 に関係なく $\pm 0.05\%$ 以内で均質に分布しているため、槽内圧力による容積変化は無視しようと考えられる。

5.2 M' の不確かさ

M' の重要な誤差要因は、吸入差圧 ($\Delta P = P_1 - P_0$)、初期温度および最終温度 (T_0 および T_1) である。流出係数の測定では、小さいノズルにおいて分割吸入が行われるため、槽内差圧が充分に取れない場合がある。このときは、容積測定の場合のように T_0 のもたらす不確かさが T_1 のものより充分に小さいとして無視することはできない。これらの要素不確かさ、(4) 式より求めたそれらの感度係数、および M' に伝播する不確かさを Table 5 に示す。

M' の相対不確かさは、おもに差圧 ΔP によって決ま

り、 ΔP が大きいほど小さい。全吸入の場合(測定 A)の系統および偶然不確かさは、95% の信頼度において、それぞれ 0.02% および 0.002% と評価された。吸入差圧が最小の場合 (E および F) は、槽内圧力が低いほど温度の感度係数が小さくなるため、 M' の不確かさは小さくなる。

5.3 t_s の不確かさ

Fig. 2 は、低速および高速バルブを用い、様々な吸入時間で測定した 200 m³/h (No. 12) ノズルの流出係数である。この測定では、バルブが全閉状態にない時間間隔を吸入時間として測定した。バルブの動作中にはノズル流量がバルブ開度に支配されて減少する時間があるため、全閉時間を吸入時間として測定した流出係数は、吸入時間が短いほど小さくなる。

前報²⁾ では、バルブとノズルの組合せに固有な(負の)量 Δt_s を吸入時間の測定値に加え、流出係数を求めた。この補正を行うと、Fig. 2 に示すように、高速バルブで吸入時間が 15 秒以上あれば $\pm 0.01\%$ 、通常バルブで 34 秒以上あれば $\pm 0.04\%$ の範囲に全ての流出係数が入った。このばらつき幅を時間計測の偶然不確かさとみなすと、そ

Table 6 Estimation of the uncertainty of q' (mol/s·m²)

Source	Typical Value	Uncertainty of source		Absolute value of sensitivity	Propagated uncertainty (mol/s·m ²)	
		Systematic	Random		Systematic	Random
P_a	100 kPa	7 Pa	5 Pa	81 mol/s·m ² ·kPa	0.57	0.40
T_a	297°K	0.05°K	0.1°K	12 mol/s·m ² ·°K	0.61	1.23
H_a	50%	2% of rdg.	0	0.46 mol/s·m ² ·%	0.92	0.00
q'	8119 mol/s·m ²				1.24	1.29
				Total	= 0.015%	= 0.016%

の大きさは高速および通常バルブで、それぞれ±1.5 ms (15 秒の±0.01%) および±14 ms (34 秒の±0.04%) となる。これらの中には温度・圧力などのばらつきも含まれるため、吸入時間計測のばらつきは実際にはさらに小さいはずである。吸入時間の系統不確かさは、通常および高速バルブでそれぞれ 15 秒および 34 秒以上の吸入時間が取られた場合は、測定に用いられたカウンタ自身もつ総合不確かさである 0.001% とした。

5.4 q' の不確かさ

q' は、 P_s , T_s , および H_s の測定値から計算される。これらの要素不確かさ、(2) 式と (8) 式から求めた感度係数、および q' に伝播した不確かさを Table 6 に示す。 q' の不確かさは、吸入気体と測定装置にのみ依存するため本測定では全ての場合において一定となり、その系統および偶然不確かさは共に 0.02% と評価された。

5.5 漏れによる M' の系統不確かさ

定積槽内の初期状態 (T_0 , P_0) と最終状態 (T_1 , P_1) の測定間に生じる定積槽の漏れは、槽内圧力と放置時間によって、大きな系統不確かさをもたらすことがある。前報²⁾ の測定では、槽内圧力は槽外よりも必ず低いため、漏れによる系統不確かさは流出係数に正の不確かさをもたらす。

漏れ速度 β (mol/s) は、単位時間当たりの槽内気体モル数の増加率で表わされ、減圧した定積槽を長時間放置し、槽内温度および圧力を測定して求めることができる。その値はおもに槽内外差圧の関数であり、その代表値は 101 kPa の差圧において 0.026 mol/h であった。ここでは、この漏れ速度の値を用い、漏れ補正を行っていない前報²⁾ の結果に生じている漏れによる系統不確かさの目安を計算する。

漏れの影響は、吸入モル数 M の誤差

$$\Delta M = \int_{t_0}^{t_1} \beta(P_{\text{out}} - P(t)) \cdot dt \quad (21)$$

として現れる。ここで、 P_{out} , t , t_0 および t_1 は、それぞれ、槽外圧力、時刻、槽内初期状態および最終状態の測定時刻を表わす。漏れは十分に小さいためにその大きさは差圧に比例するとして近似すると、漏れによる槽内気体の

増分 ΔM (mol) は

$$\Delta M \approx t_s \cdot \frac{\beta(P_{\text{out}} - P_0) + \beta(P_{\text{out}} - P_1)}{2} + (t_1 - t_0 - t_s) \cdot \beta(P_{\text{out}} - P_1) \quad (22)$$

となる。ここで、 t_s は吸入時間である。

ΔM は、低い槽内圧力が長時間保たれるほど大きくなるため、漏れによる C_d の系統誤差 $\varepsilon_{\text{leak}}$ は、測定 A) および E) においてそれぞれ最小および最大となる。(22) 式を用いてそれらの値を求めると、つぎの値となる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{leak}} &= 0.004\% \text{ (測定 A)} \\ &= 0.032\% \text{ (測定 E)} \end{aligned} \quad (23)$$

6. 流出係数の不確かさ

(10) 式に従って計算された流出係数 C_d の不確かさを、Table 7 に示す。分割吸入(測定 E および F)では、槽内初期圧力が低いほど、槽内状態測定値による M' の不確かさが小さくなるが、漏れによる系統不確かさが大きくなる。本システム²⁾ では、漏れが十分に小さいため、初期圧力を低くして測定値による M' の不確かさを小さくしたほうが流出係数の不確かさが小さくなる。

吸入時間が最小(144 秒)の場合でも、バルブの通常または高速にかかわらず、吸入時間の不確かさの寄与は十分に小さい。

流出係数の総合偶然不確かさは、 q' に支配されるためほぼ一定となり、全ての測定においてほぼ 0.02% となった。

ノズル直径が小さいほど総合系統不確かさが大きくなる理由は、直径測定の不確かさの寄与が大きく、かつ、吸入差圧が十分に取れないことによる。直径測定を含まない質量流量測定の総合系統不確かさは、測定 A~E および F において、それぞれ、0.03~0.05 および 0.09% となる。

7. おわりに

我国の気体流量の第一次国家標準として開発された定積槽システムを用いて測定された ISO 9300 型ソニックベンチュリノズルの流出係数²⁾ について、ISO 5168 または ANSI/ASME PTC 19.1 に従って不確かさの評価を行った。

Table 7 Estimation of the uncertainty of C_d

Parameter	Name of measurement	Typical value of the parameter	Sensitivity	Uncertainty of the parameter(%)	
				Systematic	Random
V	A, E, F	13.37 m ³	1	0.022	0
M'	A	326 mol/m ³	1	0.019	0.002
	E	86.0 mol/m ³		0.032	0.006
	F	85.6 mol/m ³		0.084	0.008
Leakage (M')	A	0.0008mol/m ³	1	0.003	0
	E	0.0019mol/m ³		0.029	0
	F	0.0009mol/m ³		0.014	0
q'	A, E, F	8119mol/s•m ²	1	0.015	0.016
D	A	18.9 mm	2	0.016	0
	E, F	4.77 mm		0.063	0
t_s	A	144 s	1	0.001	0.001
	A'	144 s			0.010
	E, F	600 s, 597 s			0.002
Total (%)				A) 0.046	0.016
				A') 0.046	0.019
				E) 0.136	0.017
				F) 0.154	0.018
				A) 0.048	
				A') 0.049	
				E) 0.137	
				F) 0.155	

大気圧状態にある 12.5~200 m³/h の 5 種のノズルの流出係数の総合不確かさは、ノズル直径と共に減少し、最大および最小ノズルにおいて、95%の信頼度における総合不確かさがそれぞれ±0.05%および±0.14%と評価された。この変化は直径測定の不確かさに大きく支配され、直径測定が含まれない質量流量の測定では全てのノズルの流出係数を±0.05%以下の不確かさで測定することができるとを示した。

参 考 文 献

- 1) ISO 9300-1990(E): Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles
- 2) 石橋, 植木, 高本, 渡辺, 早川, 荒石: 常圧におけるソニックベンチュリノズルの高精度校正, 計測自動制御学会論文集, 28-12, 1411/1418 (1992)
- 3) L. Olsen and G. P. Baumgarten: Gas Flow Measurement by Collection Time and Density in a Constant Volume, Proceedings of the First symposium on Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, 1287/1295 (1974)
- 4) ISO 5816-1978(E): Measurement of Fluid Flow- Estimation of Uncertainty of a Flow-rate Measurement
- 5) ANSI/ASME PTC 19.6-1985: Supplement of Instruments and Apparatus, Part 1, Measurement Uncertainty
- 6) E. R. Cohen and B. N. Taylor: The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants, Reviews of Modern Physics 59(4)1121/1148 (1987)
- 7) 日本化学会編: 化学便覧(改訂 3 版), 丸善(1984)
- 8) Kaye and Laby: Tables of Physical and Chemical

Constants (Fifteenth Edition), Longman (1986)

- 9) P. E. Parker: CONCISE Encyclopedia of SCIENCE & TECHNOLOGY, McGraw-Hill (1984)
- 10) 物理学辞典編集委員会編: 物理学辞典, 培風館(1984)

[著 者 紹 介]

石 橋 雅 裕 (正会員)

1985 年, 筑波大学大学院博士課程物理工学専攻修了。同年通産省工業技術院計量研究所入所, 現在に至る。気体流量標準の研究に従事(工学博士)。日本音響学会の会員。

植 木 正 明

1978 年, 東京都立航空工業高等専門学校機械工学科卒業。同年計量研究所に入所。圧力標準に関する研究に従事, 応用物理学会, 精密工学会などの会員。

高 本 正 樹 (正会員)

1986 年, インベリアルカレッジ Ph. D コース修了. 75 年計量研究所入所. 流量・流速の標準確立, 計測法に関する研究に従事. 現在, 力学部流体計測研究室長, 日本機械学会, 日本流体力学会, 可視化情報学会などの会員(工学博士).

早 川 洋 平

1988 年, 島根大学理学部物理学科卒業. 同年日本科学工業(株)入社, 現在に至る. 粒子計測器設計に従事.

渡 辺 紀 之 (正会員)

1963 年, 千葉大学工学部機械工学科卒業. 翌年通商産業省工業技術院計量研究所入所, 現在に至る. 流量計測技術と流量標準の研究に従事.

荒 石 潔 (正会員)

1967 年, 神戸大学理学部物理学科卒業. 同年日本科学工業(株)入社, 現在に至る. 熱線流速計関連の研究開発に従事.

=====