

異種ガスを用いた抵抗要素の流量特性

浅野誠一郎*・香川利春**・竹内智朗***・池田駿介*

Study on Gas Flow Characteristics of Different Gases for Nozzles

Seiichiro ASANO*, Toshiharu KAGAWA**, Tomoaki TAKEUCHI*** and Syunsuke IKEDA*

Abstract: In this paper flow characteristics were measured by both the JISB8390 procedure and pressure response test. The pressure response test was an alternative method to obtain flow characteristics by using an isothermal chamber. The characteristics for 2 types of restriction, which were a nozzle and a bell mouse type nozzle, of the test can be measured within 3% error. It means the pressure response test has sufficient accuracy. The mean temperature inside an isothermal chamber changed within 2K and 1% for 5 kinds of compressible fluid, which were Ar, Air, city gas, He and H₂. The discharge coefficient of 2 types of restriction was measured for 5 kinds of compressible fluid by the pressure response test. The discharge coefficients have to be specified in case of choked flow. The value were 0.96 on the Reynolds number range from 4.0×10^4 to 1.5×10^5 for a bell mouse type nozzle, 0.80 on the Reynolds number range from 3.5×10^4 to 1.5×10^5 for a nozzle. Key words: Pressure response test, Isothermal chamber, Discharge coefficient

1. はじめに

都市ガスのガス供給ラインや半導体工場において、様々な物性を持つ圧縮性流体が利用されている。これらの流体の圧力はガス整圧器(ガスガバナ)と呼ばれる圧力制御弁¹⁾によって制御されている。この制御弁には円筒ノズルやベンチュリノズルなど様々な抵抗要素が用いられている。これらの抵抗要素を用いてガスの圧力を制御し安定供給することが望まれる。そのためには抵抗要素の流量特性を明らかにし、圧力制御弁を構成することが不可欠である。

様々な圧縮性流体を用いた圧力制御弁の流量特性試験においては、安全性および経済性の観点から空気で行われることが一般的である。圧縮空気による抵抗要素の流量特性の試験はJISB8390²⁾、ISO6358³⁾に規定されており、音速コンダクタンスと臨界圧力比によって表わすことが決められている。この抵抗要素を様々な物性を持つ圧縮性流体に用いる場合は、実ガスによる流量特性の校正が不可欠となる。その流量特性を把握するための試験装置には、防爆対策やガス回収、温度管理などの様々な設備が必要となる。様々な圧縮性流体を用いた流量計測に関しては、音速ノズルを用いた実験⁴⁾が実施され、11種類の

気体に対して流出係数が決定された。これらの試験方法では圧縮性流体を長時間流し続けるため、多くの試験気体と時間および設備が必要とされる。

しかし近年、計測時間の短縮ならびに省エネルギー、排出規制などへの要求が高まっている⁵⁾。このような背景のなか、著者らはISO6358の代替試験法として圧力応答法による等温化放出法を提案した⁶⁾。この手法においては容器内の状態変化を等温に保つことができる等温化圧力容器を用いている。この圧力容器から充填された圧縮空気を放出し、その瞬時流量から流量特性を把握できることを明らかにしている⁷⁾。これによる計測時間は数十秒程度しか必要としない。この等温化圧力容器を用いて、容器内の圧力応答波形を計測し、この波形から電磁弁、サイレンサおよび速度制御弁の抵抗要素の流量特性を求めた。そして音速コンダクタンスが3%以内の誤差であり、また臨界圧力比においては0.06程度の誤差であることが確認された。この圧力応答法による流量特性の結果は誤差範囲内に収まっていることから、実用上十分な精度が確保されている。しかし、この試験方法では実ガスによる流量特性の評価はなされていない。

そこで本研究では、様々な物性を持つガスを等温化圧力容器内に充填し、大気圧下に放出する際の等温化圧力容器内の圧力応答波形から抵抗要素の流量特性を計測することを目的とする。実験に用いた抵抗要素は、ガスガバナに一般的に用いられる2種類のノズルとした。これらの抵抗要素を用いた圧力応答法の測定精度を把握するために、まず圧縮空気を用いてJISB8390の測定法と比較し、流量特性結果の精度について考察する。そして異種ガスを用いた圧力応答法を実施し2種類の抵抗要素の流出係数を算出し、この値とレイノルズ数との関係について考察する。最後に圧力応答法にて用いた抵抗要素の流量特性を無次元化し、

*東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

**東京工業大学精密工学研究所

***東京ガス(株) パイプライン技術センター

*Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Institute of Technology

**Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

***Pipeline Technology Center, Tokyo Gas Co., Ltd

(Received January 21, 2009)

流出係数の妥当性を評価する．そして本実験にて用いなかった実ガスに対する流量特性の一般化を試みる．

2. 圧縮空気を用いた 2 種類の測定法の比較

実験に用いた抵抗要素は Fig.1 に示すノズル-1, ノズル-2 の 2 種類とした．ノズル-1 は流路の入口部分がベルマウス形状のテーパノズルでその直径は 2.5mm である．ノズル-2 は円筒ノズルでその直径は 2.0mm である．

JISB8390 では流量特性の計測法として, 上流圧を設定し, 定常状態に達した後定常状態の流量を計測する方法が規定されている．JISB8390 による流量特性を計測する試験回路を Fig.2 に示す．この方法を用いて抵抗要素の空気圧による流量特性を計測する抵抗要素の上流側圧力は 120kPa から 700kPa まで 20kPa ごとに順次設定し, 下流側に接続した乾式ガスメータにて流量を計測した．

つぎに, ISO6358 の代替試験法として圧力応答法により流量特性を測定する．この方法は, 等温化压力容器に充填された圧縮空気を放出し, その瞬時流量を計測する方法である．圧力応答法による流量特性を計測する試験回路を Fig.3 に示す．試験回路は上流側より, ハンドバルブ, 等温化压力容器, ハンドバルブ, 抵抗要素の順序にて組み, データをパソコンに取り込んだ．実験は以下の手順にて実施した．まず等温化压力容器の充填初期圧力 P_s を 700kPa に設定した．そしてバルブ-1 を閉塞し, 等温化压力容器の下流側のバルブ-2 を開き, 等温化压力容器内の圧力を計測した．実験に用いた等温化压力容器の銅線の線径および充填率は規定されている値⁸⁾を用い線径は 50 μ m, 充填率は 400kg/m³とした．また容積 V は 1.0 \times 10⁻²m³ のものを用いた．

等温化容器内の圧縮性流体に関する状態方程式 $PV = WR\bar{\theta}$ を時間微分すると以下の式を得る．

$$V \frac{dP}{dt} = R\bar{\theta} \frac{dW}{dt} + WR \frac{d\bar{\theta}}{dt} \quad (1)$$

ここで, R : ガス定数[J/(kg \cdot K)], V : 压力容器の有効容積[m³], W : 気体の質量[kg], $\bar{\theta}$: 容器内の平均温度[K]である．容器内の状態変化が等温変化であれば, 容器内の平均温度 $\bar{\theta}$ は大気温度 θ_a となる．よって, 放出時の質量流量は等温化压力容器内の圧力微分値に比例する．

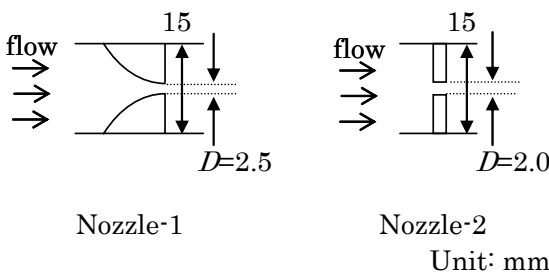


Fig.1 Schematic drawing of 2 restrictions

$$G = \frac{dW}{dt} = \frac{V}{R\theta_a} \frac{dP_1}{dt} \quad (2)$$

ここで, G : 質量流量[kg/s], P_1 : 等温化压力容器内の圧力[Pa], θ_a : 大気温度[K]である．

ノズルを通過する質量流量は, 比熱比およびノズルの有効断面積を用いた次式⁹⁾で与えられる．

$$\begin{cases} \text{i) Subsonic flow} \\ G = S_e P_1 \sqrt{\frac{2\kappa}{R\theta_a(\kappa-1)} \left\{ \left(\frac{P_a}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_a}{P_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}} & \frac{P_a}{P_1} > b \\ \text{ii) Choked flow} \\ G = S_e P_1 \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{2\kappa}{R\theta_a(\kappa+1)}} & \frac{P_a}{P_1} \leq b \end{cases} \quad (3)$$

ここで, S_e : 有効断面積[m²], P_a : 大気圧[Pa], b : 臨界圧力比[-]である．有効断面積および臨界圧力比は以下の式により求める．

$$S_e = C_d A = C_d \frac{\pi D^2}{4} \quad (4)$$

$$b = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (5)$$

ここで, C_d : 流出係数[-], D : ノズルの直径[m], κ : 比熱比[-]である．

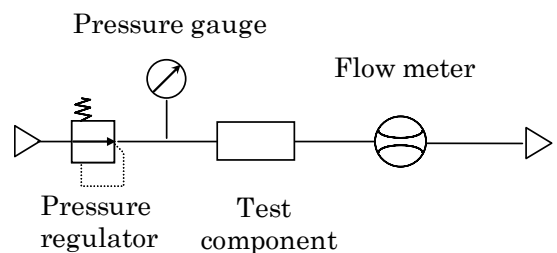


Fig.2 Experimental apparatus of JIS B 8390 procedure

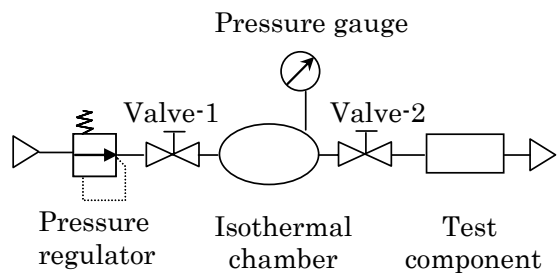


Fig.3 Experimental apparatus of pressure response test

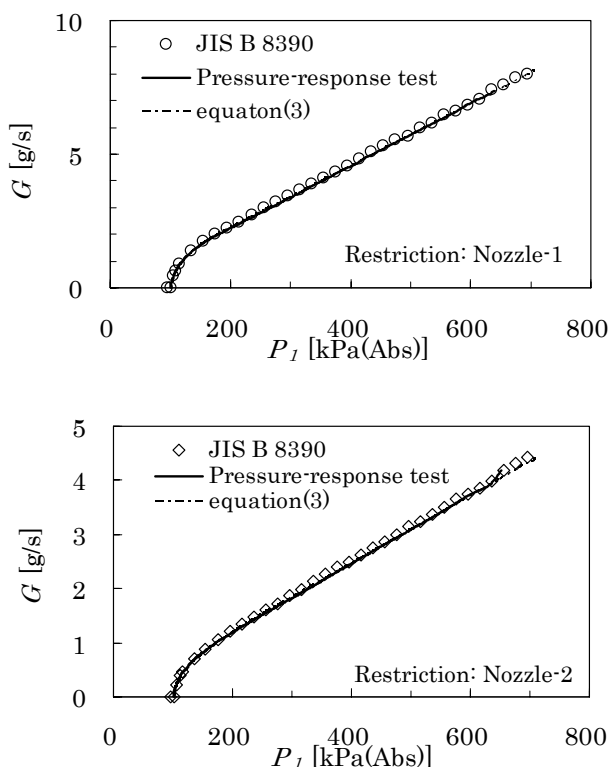


Fig.4 Flow characteristics of 2 restrictions

Table 1 Experimental result of sonic conductance

	$C \cdot 10^{-9} [s \cdot m^4/kg]$		Error [%]
	JISB8390	Pressure response	
Nozzle-1	3.18	3.14	1.2
Nozzle-2	4.89	4.77	2.4

JISB8390 および圧力応答法により計測した圧力流量特性を Fig.4 に示す。また、Fig.4 には(3)式により求めた流量の結果も示した。図は上からノズル-1、ノズル-2 の順に示す。圧力流量特性の結果より、それぞれの抵抗要素における音速コンダクタンスを以下の(6)式から算出し Table1 に示す。

$$C = \frac{G}{\rho P_1} \quad (6)$$

ここで、 C : 音速コンダクタンス [$s \cdot m^4/kg$] である。

(3)式のチョーク流れの ii)式が適用された圧力範囲は、ノズル-1 に関して等温化圧力容器内の圧力が約 195kPa までであり、ノズル-2 に関して等温化圧力容器内の圧力が約 190kPa までであった。JISB8390 の測定法から算出した音速コンダクタンスを基準とし、圧力応答法から求めた値との誤差はノズル-1 で 1.2%、ノズル-2 で 2.4%であった。これらの結果は 3%以内の

Table 2 Properties of 5 compressible fluids

			R	b
Ar	1.6	1.7	208	0.488
Air	1.2	1.4	287	0.528
City gas	0.76	1.3	451	0.546
He	0.16	1.7	2079	0.488
H ₂	0.08	1.4	4129	0.527

Table 3 Experimental result of mean temperature

	θ_a [K]	$\bar{\theta}$ [K]	$\theta_a - \bar{\theta}$ [K]	Error [%]
Ar	288.2	286.5	1.7	0.6
Air	288.0	287.6	0.35	0.1
City gas	282.7	282.0	0.71	0.3
He	289.7	288.6	1.1	0.4
H ₂	288.1	287.2	0.93	0.3

誤差に収まることが確認された。

3. 異種ガスを用いた圧力応答法

圧力応答法により、2 種類のノズルとの流量特性は圧縮空気を用いて 3%以内の精度で測定できることを確認した。つぎに 5 種類の物性の異なる圧縮性流体を用いて 2 種の抵抗要素の流出係数を算出する。実験にて用いた圧縮性流体の種類とおおのこの物性値を Table2 に示す。実験に用いた 5 種類的气体はアルゴンガス(Ar)、空気(Air)、都市ガス(City gas)、ヘリウムガス(He)および水素ガス(H₂)である。Table2 は左から 20、100kPa での気体の密度 $\rho [kg/m^3]$ 、比熱比 $\kappa [-]$ 、ガス定数 $R [J/(kg \cdot K)]$ 、臨界圧力比 $b [-]$ である。

ここで、圧縮性流体の物性の違いによる等温化圧力容器内の温度変化が等温であることを確認するために、ストップ法⁶⁾を用いて容器内の平均温度を求めた。ストップ法とは、空気放出過程の容器の弁を急閉鎖し、容器内空気の非定常状態における平均温度を測定する方法である。Table3 に実験に用いたガス温度変化の結果を示す。温度変化は 2K 以内、大気温度との誤差は 1%以内であり、実験に用いた異種ガスの等温化圧力容器内での状態変化は、等温変化であることが確認された。

5 種類的气体に対する等温化容器内の圧力応答波形を Fig.5 に示す。ノズル-1 においては、圧力容器から放出する H₂ の圧力降下速度が 100kPa/s を超えてしまったため、容器内の状態変化が等温変化とならなかった。したがって、

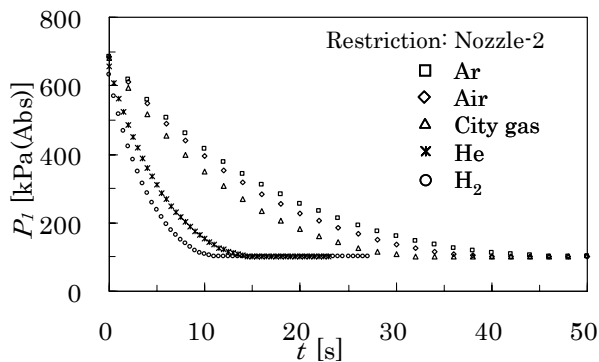
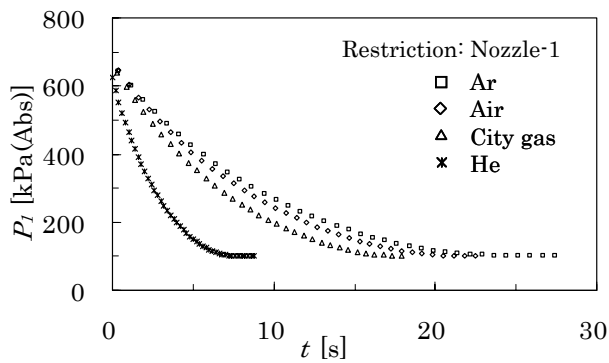


Fig.5 Pressure response of 2 restrictions

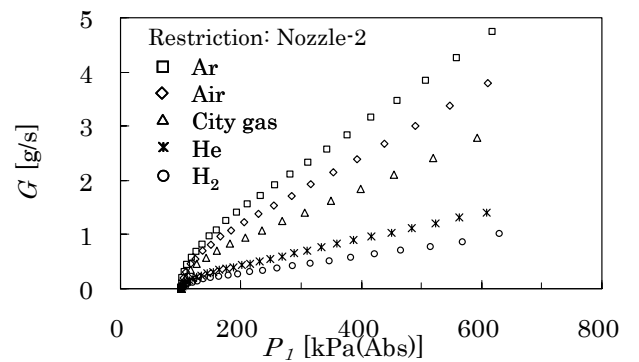
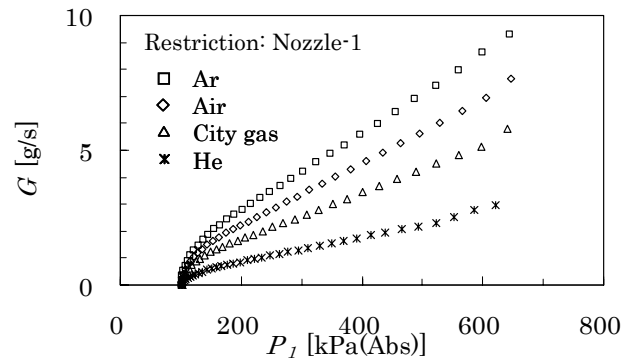


Fig.6 Flow characteristics of 2 restrictions

H₂を除く4つのガスの結果を示した。容器内の異種ガスの質量は、等温化圧力容器の容積に密度を乗じた分だけ充填されたこととなる。したがって、容器からの放出時間は充填されている質量に比例することが確認された。つまり等温化圧力容器から放出される時間はガスの密度に依存することがわかる。圧力応答波形から、Airを基準気体とすると、Airよりも密度が大きいArは放出時間が長いことが示された。一方、Airよりも密度が小さいCity Gas, He および H₂は密度の大きさに準じて放出時間が短くなることが示された。

つぎに、圧力応答波形を用いて5種類のガスに対する圧力流量特性を求め Fig.6 に示す。質量流量は(2)式を用いて、等温化圧力容器内の圧力値から算出した。等温化圧力容器から放出時間が基準気体の Air よりも長かった Ar の圧力微分値は小さくなるが、Fig.6 に示されるように質量流量は大きい値となる。これは等温化圧力容器内の状態変化が等温であり、(2)式からもわかるように質量流量はガス定数に反比例する。つまり、抵抗要素を通過する質量流量は気体の密度に比例することが示された。各ガスに関して圧力比が Table2 に示す臨界圧力比よりも小さいチョーク流れにて、等温化圧力容器内の圧力に比例した流量が流ることが示されている。さらに圧力が降下し、圧力比が臨界圧力比を越える亜音速流れにて質量流量の降下は非線形であることがわかる。これは抵抗要素の上流と下流の圧力比、

流入形状などの影響を受けるためであると考えられる。

Fig.6 に示した圧力流量特性の結果から抵抗要素の流出係数を算出しレイノルズ数と比較する。有効断面積を表わす(4)式を(3)式のチョーク流れの ii)式に代入し、それを等温化圧力容器内の圧力微分値により放出流量を算出した(2)式と連立して流出係数を求める。この係数をレイノルズ数と比較する。ノズルを通過する流体のレイノルズ数を以下の(7)式で与える。

$$Re = G \times \frac{D}{\mu A} \quad (7)$$

各抵抗要素のレイノルズ数と流出係数の結果を Fig.7 に示す。各抵抗要素のチョーク流域と亜音速流域のレイノルズ数の閾値は、ノズル-1 が 40000 ($P_1 > 195\text{kPa}$)、ノズル-2 が 35000 ($P_1 > 190\text{kPa}$)である。レイノルズ数がそれぞれの閾値より高い領域、つまりチョーク流れにおいては流出係数の値はガス種によらず一定値となり、ノズル-1 の流出係数は 0.96、ノズル-2 は 0.80 程度であった。レイノルズ数が閾値以下、つまり亜音速域においては、レイノルズ数の減少とともに小さくなることが示された。

ノズル-1 およびノズル-2 の流出係数の違いは、ノズル-1 の流路の入口部分がベルマウス形状のテーパノズルであるため、ノズル-2 の円筒ノズルと比べてノズル部での流れ

の剥離の影響が少なかったといえる。そのため流体抵抗が低減され、流出係数が大きい値となったことがわかる。

圧力応答法にて用いた抵抗要素の流量特性を初期の充填圧力 P_s (700kPa)における質量流量を基準として無次元化し(8)式に示す。

$$\begin{cases}
 \text{i) Subsonic flow} \\
 G^* = P^* \left(\frac{\kappa+1}{2} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \left\{ \left(\frac{P_a^*}{P^*} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_a^*}{P^*} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}} \quad \frac{P_a^*}{P^*} > b \\
 \text{ii) Choked flow} \\
 G^* = P^* \quad \frac{P_a^*}{P^*} \leq b
 \end{cases} \quad (8)$$

また大気圧力および圧力容器内の圧力を初期の充填圧力 P_s で無次元した値 P_a^* および P^* を(9)式および(10)式に示す。

$$P_a^* = \frac{P_a}{P_s} \quad (9)$$

$$P^* = \frac{P}{P_s} \quad (10)$$

(8)式の i), ii)および(10)式を用いて 5 種類のガスに対する圧力流量特性を無次元化し Fig.8 に示す。Fig.8 に示されるように、

本計測法により計測した圧力応答波形から算出した流量特性は、用いたガス種によらず、ノズル-1 およびノズル-2 の無次元圧力に対する無次元流量は同一傾向であることがわかる。この結果から、本実験にて用いなかった実ガスに対する流量特性は以下の手順で算出する。

等温化圧力容器に基準ガスである Air を充填し、抵抗要素の流量特性を圧力応答法によって実施する。得られた圧力応答波形から(2)式によって質量流量を求める。そして(3)式および(4)式を用いて流出係数を決定する。この流出係数の値と実ガスの密度と比熱比を(3)式に適用することで質量流量が求まる。

4. 結論

2 種類の抵抗要素を用いた圧力応答法の測定精度を、空気をを用いた JISB8390 による測定法と比較し把握した。その結果、圧力応答法の測定誤差が 3%以内であり、実用上十分な精度を有する測定結果であったことを確認した。この測定法により計測した圧力応答波形を用いて 5 種類のガスを用いて抵抗要素の流量特性を明らかにした。

5 種類のガスを等温化圧力容器内に充填し大気圧下に放出したときの容器内の温度変化は 2K 以内、大気温度に対して 1%以内であった。したがって、実験に用いた異種ガスの等温化圧力容器内での状態変化は、等温変化であることが確認された。

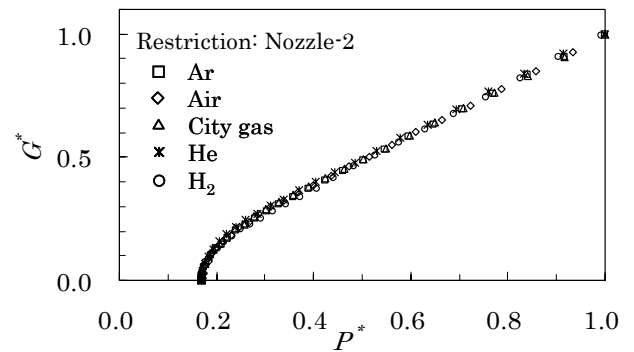
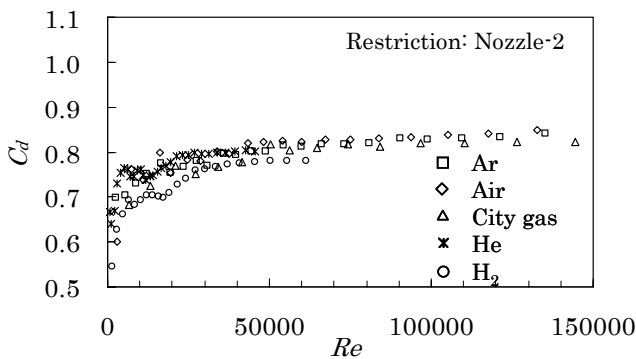
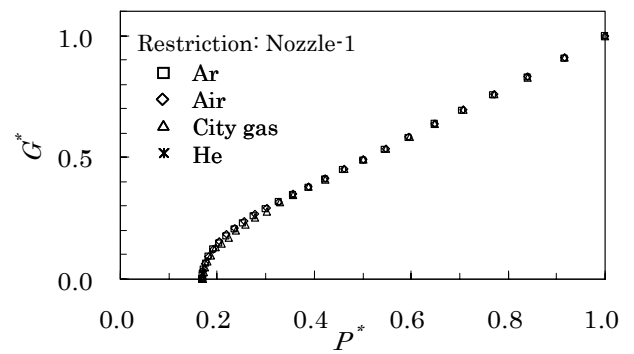
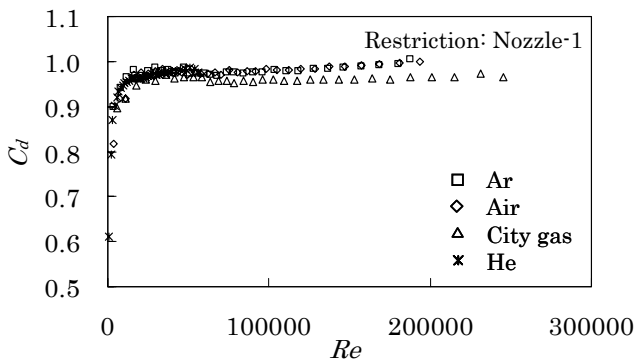


Fig.7 Discharge coefficient against Reynolds number

Fig.8 Non-dimensional flow characteristics

放出の際の圧力応答波形を理論から導いた流量式と比較して、抵抗要素の流出係数が決定され、テーパノズルにおいては0.96程度、剥離による流体抵抗の影響を受けた円筒ノズルの流出係数は0.80程度であることが確認された。この流出係数により無次元化された圧力流量特性はガス種に依存しないことを示した。そして等温化圧力容器を用いた圧力応答法により、実ガスの圧力流量特性の算出方法が一般化されたことを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 日本ガス協会：都市ガス工業概要(供給編)，日本ガス協会(1997)
- 2) JIS B 8390: 空気圧—圧縮性流体用機器—流量特性の試験方法(2000)
- 3) ISO6358: Pneumatic Fluid Power - Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids - Part3: Alternative test methods - discharge test(2006)
- 4) 中尾，平山，高本：音速ノズルと流出係数とガス種との関係，日本機械学会論文集(B編)，66-642，438/444(2000)
- 5) 資源エネルギー省：エネルギー白書 2007，経済産業省(2007)
- 6) 香川，川嶋，藤田，田中，榎：等温化圧力容器を用いた有効断面積の計測法，油圧と空気圧，26-1，79/81(1995)
- 7) 王，蔡，川嶋，香川：流量拡張表示式を用いた等温化放出法による空気圧要素の流量特性の計測，日本フルードパワーシステム学会論文集，36-4，102/108(2005)
- 8) 川嶋，藤田，香川：容器内圧力変化による圧縮性流体の流量計測法，計測自動制御学会論文集，32-11，1485/1492(1996)
- 9) 香川，清水：空気圧抵抗容量系の熱伝達を考慮した無次元圧力応答，油圧と空気圧，19-4，54/59(1987).

[著 者 紹 介]

浅 野 誠 一 郎 (学生会員)



2004年信州大学工学部社会開発工学科卒業。2006年東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻修士課程修了。同年同専攻博士課程に入学。現在に至る。圧縮性流体の計測と制御に関する研究に従事。

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。1976年東京工業大学工学部制御システム工学科助手，同講師，同助教授を経て，現在同大学精密工学研究所教授。流体制御システム，流体計測，生体計測に関する研究に従事。計

測自動制御学会評議員，日本フルードパワーシステム学会理事，日本機械学会などの会員。工学博士。

竹 内 智 朗



2001年東京工業大学工学部卒業。2003年同大学院理工学研究科修士課程修了。同年東京ガス入社。現在，同社パイプライン技術センターにて流体制御や流体解析など都市ガス供給に関する研究開発に従事。

池 田 駿 介



1968年東京大学土木工学科卒業。同大学院を経て，米国アイオワ大学客員教授，中国大連理工大学客座教授を歴任し，現在東京工業大学理工学研究科教授。流体力学，環境水理学に関する研究に従事。土木学会上級技術者資格委員会委員長，国土交通省建設技術研究開発評価委員会委員長，日本学術振興会専門委員。工学博士。