水素における等温化放出法による流量測定

大 川 陽 一*・尹 鍾 皓**
中 村 善 也***・香 川 利 春**

Study on Flow-rate Characteristics with the Isothermal Discharge Method in Hydrogen

Yoichi OKAWA*, Chongho YOUN**,
Yoshinari NAKAMURA*** and Toshiharu KAGAWA**

The thesis of this study is to investigate that the measurement accuracy of the isothermal discharge method for hydrogen gas with an isothermal tank which is designed for measuring the flow-rate characteristics of pneumatic components. Compressed gas in an isothermal tank, which is combined three types of orifice, is discharged from 700 kPa(abs) to atmospheric pressure. The average temperature in the tank during discharge is measured experimentally. Experimental results and the measurement errors of the isothermal discharge method in hydrogen and air are compared. In consequence, when hydrogen and air is discharged with same pressure drop rate respectively, the temperature change in hydrogen is less than the one in air. When the maximum discharge rate is 35.6 kPa/s during discharge hydrogen, the measurement error is less than 3% in whole discharge time. The difference between the temperature change in hydrogen and air is discussed qualitatively in the view point of the relation among Nusselt number, Reynolds number and Prandtl number. As a result, it is investigated that the heat exchange between hydrogen and copper wire is five times larger than the one between air and copper wire.

Key Words: hydrogen, flow-rate characteristics, isothermal discharge method, isothermal tank, discharge speed

1. はじめに

水素は、環境対策やエネルギーセキュリティの観点から次世代エネルギーの一つとして期待されており、水素社会の実現へ向けた研究および開発がなされている。日本国内では「水素利用社会システム構築実証事業」の一環として、東京都心と羽田・成田両空港間を燃料電池で動くバスやハイヤーの運行実証試験（水素ハイウェイプロジェクト）¹⁾や、福岡県北九州市で水素エネルギーモデルタウンの構築を目指した社会実証試験（「北九州水素タウン」プロジェクト）²⁾がそれぞれ2010年、2011年から開始されている。配管によって水素を供給するシステムが一般化するにつれて、水素用の流体機器

の普及が予想される。

水素を含めた工業プロセスで用いられる調節弁の流量特性は、IEC 60534³⁾、JIS B 2005⁴⁾に規定されている。これらの試験法は、静的な流量特性を逐一計測するために、時間を非常に要し、その間プロセスガスを消費し続けるため、エネルギーコストの面で欠点がある。プロセスガスの消費量の低減と計測時間の短縮を可能にするために、容器内にプロセスガスを充填し、放出する際の容器内圧力応答から流量特性を得る方法が提案されているが、放出時の容器内温度の変化が激しく、流量計算式が煩雑化するために実用化には課題がある⁵⁾。

一方、圧縮空気を利用した抵抗要素の流量特性の測定試験法にも、静的な流量特性としてISO 6358規格⁶⁾が多くで採用されており、日本ではISO 6358規格を翻訳したJIS B 8390⁷⁾が規定されている。そこで筆者らは、空気圧機器の流量特性の非定常な計測法として、等温化压力容器を用いた等温化放出法を提案し、その有用性を明らかにしてきた^{8)~10)}。さらに、放出中に容器内の等温性を保つために必要な充填材の充填率や圧力放出速度に関する検討も王ら¹¹⁾によって行なわれており、ISO 6358の代替試験法としてFDISまで審議されている。低コスト・短時間での計測が可能な等温化放出法は、空気圧機器のみならず、実際の現場で使用されるプロセスガスによる流量特性計測にも有効であると考えられる。

そこで本論文では、等温化放出法を水素用機器の流量特性

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科
横浜市緑区長津田町 4259 R2-45

** 東京工業大学精密工学研究所
横浜市緑区長津田町 4259 R2-45

*** KYB (株) 技術開発本部 相模原市南区麻溝台 1-12-1

* Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259 R2-45 Nagatsudacho, Midori-ku, Yokohama

** Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259 R2-45 Nagatsudacho, Midori-ku, Yokohama

*** KYB Corporation, Basic Technology R&D Center, 1-12-1 Asamizodai, Minami-ku, Sagami-hara

(Received August 8, 2011)

(Revised May 1, 2012)

計測に適応することを目的とする。そのために、空気圧機器の流量特性計測用に設計された等温化压力容器を用いて、水素における等温化放出法による流量測定実験を行ない、その計測精度に関して検討を行なった。空気の物性と水素の物性は、Table 1¹²⁾に示すように異なる。抵抗要素の流量特性を等温化放出法によって測定する際に、作動流体が空気と水素によって、要求される等温化压力容器の容器体積が異なる可能性がある。等温化放出法の測定精度は、温度降下と圧力降下の比で決定される。同一の抵抗を接続して等温化放出法を実行した際、空気と比較して、水素の密度は低いために放出速度が増大するが、水素の定積比熱は、空気の定積比熱よりも14倍大きいために放出による温度降下の影響が相殺されると考えられる。そこで、空気圧機器の流量特性計測用に製造された等温化压力容器を用いて、水素における等温化放出法を行ない、空気における等温性・計測精度と比較した。

なお、空気以外の気体を用いた等温化放出法に関しては、浅野ら¹³⁾による報告がなされているが、気体放出過程において、最も温度が降下した点の値を用いて等温化放出法の計測誤差を求めている点、等温化压力容器からの気体放出速度の上限値に対して、空気において検討された値をそのまま他の気体においても使用している点から、計測誤差に対する検討は十分ではなかった。そこで本論文では、放出中の計測誤差の時間変化を実験的に求める。得られた結果を用いて、水素用機器の流量特性計測における有効性を評価した。

Table 1 Comparison of physical properties between air and hydrogen

	Air ⁽¹⁾	Hydrogen ⁽²⁾	(1) / (2)
density [kg/m ³]	1.176	0.00808	145.5
thermal conductivity [mW/(m·K)]	26.23	181.2	0.145
specific heat at constant volume [kJ/(kg·K)]	0.718	10.1	0.0711
specific heat ratio [-]	1.40	1.41	0.99
viscosity coefficient [μPa·s]	18.57	8.955	2.074
gas constant [J/(kg·K)]	287	4124.3	0.0696

at 300 K, 101.3 kPa

主な記号

C_p	: 定圧比熱	[J/(kg·K)]
C_V	: 定積比熱	[J/(kg·K)]
G	: 質量流量	[kg/s]
G_{exp}	: 気体放出時の温度変化を考慮した場合の質量流量	[kg/s]
G_{idm}	: 気体放出が等温で行なわれると仮定した場合の質量流量	[kg/s]
G_{ref}	: 絞りを通過する質量流量	[kg/s]

h	: 容器内気体と充填材との間の熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
δH	: 気体のエンタルピー変化	[J]
P	: 容器内圧力	[kPa(abs)]
P_a	: 大気圧力	[kPa(abs)]
δq_1	: 外部と交換した熱量	[J]
δq_2	: 充填材と交換した熱量	[J]
R	: 気体定数	[J/(kg·K)]
S_h	: 容器内気体と充填材および容器壁との伝熱面積	[m ²]
S_e	: 流体抵抗部有効断面積	[m ²]
T	: 容器内気体の平均温度	[K]
t	: 時間	[s]
t^*	: 無次元時間 ($= t/T_p$)	[-]
T_a	: 大気温度	[K]
T_c	: 充填材の温度	[K]
T_p	: 容器内圧力平衡時定数	[s]
u	: 系に出入りする気体の平均速度	[m/s]
dU	: 系の内部エネルギーの変化	[J]
V	: 等温化压力容器の有効容積	[m ³]
W	: 容器内の気体質量	[kg]
κ	: 比熱比 ($= C_p/C_V$)	[-]
ρ	: 気体密度	[kg/m ³]

2. 等温化放出法

等温化压力容器とは、内部に直径 50 μm の銅線が充填率 4%で充填されている压力容器である。圧縮空気を用いた等温化压力容器の精密なモデル化は、川嶋ら¹⁴⁾によってなされている。压力容器内の等温性は、等温化放出法における計測精度に直接影響を及ぼす因子である。そのため、今回は、等温化压力容器から気体を放出させたときの容器内のエネルギー収支から、仕事率を実験的に求め、気体の物性や放出速度が等温化压力容器の等温性に及ぼす影響を考察する。

本論文で取り扱う抵抗容量系を Fig. 1 に示す。容器から気体を放出する際に、開いた系に対する熱力学第一法則を適用する。抵抗要素と容器が短い管路で結ばれているとする。容器内気体の温度は膨張、圧縮のために変化する。また圧力は、

Fig. 1 Open thermodynamic system

抵抗部を除き、容器内では一様であるが、容器内の温度は分布していると考えられる。そこで、微小体積を dV 、密度を ρ として、容器内気体の温度の代表値として次式で示すように平均温度 $\bar{T}$ を取る。

$$\bar{T} = \frac{\int \rho T dV}{\int \rho dV} = \frac{\int \rho T dV}{W} \quad (1)$$

容器内圧力 P は分布していないため、気体の状態方程式から、平均温度 $\bar{T}$ 、平均密度 $\bar{\rho} = W/V$ および気体定数 R によって

$$P = \bar{\rho} R \bar{T} \quad (2)$$

と示される。(2) 式を時間に対して微分し、 $G = -dW/dt$ を用いて表示すれば、

$$\frac{dP}{dt} = \bar{\rho} R \frac{d\bar{T}}{dt} - \frac{R\bar{T}}{V} G \quad (3)$$

となることから、(3) 式を変形して G について解けば、

$$G_{exp} = \frac{W}{\bar{T}} \frac{d\bar{T}}{dt} - \frac{V}{R\bar{T}} \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

となる。等温化放出法では、(4) 式において容器内温度を等温と見なせるとき、容器内圧力変化から質量流量を得る。すなわち、

$$G_{idm} = -\frac{V}{R\bar{T}} \frac{dP}{dt} \quad (5)$$

を用いる。上式から明らかなように、等温化放出法は容器内の圧力変化のみによって流量を得るために、下流側にどのような形状の抵抗要素が設置されていても流量計測が可能である。

容器内に温度変化が生じる現象について考察するために、気体放出時における充填材と容器内気体との間の熱伝達について検討する。

Fig. 1 に示すような開いた系における容器内気体および容器に出入りする気体に関するエネルギー保存則は、以下のようになる。

$$dU = \delta q_1 + \delta q_2 - p dV + \left(\delta H + \frac{1}{2} \delta W \cdot u^2 \right) \quad (6)$$

上式について考える。流速が非常に速くて音速に近い場合を除外すれば、流出気体の運動エネルギー $(\delta W \cdot u^2)/2$ を無視することができる。さらに川嶋らは、外部と交換した熱量 δq_1 を無視できることを明らかにしている¹⁴⁾。また、外部への仕事は 0 である。

そのために (6) 式右辺は最終的に、

$$dU = \delta q_2 + \delta H \quad (7)$$

となる。

本条件では、容器体積は不変であるために、気体放出は等積変化である。したがって、微小時間に得られた熱量の総量は、すべて容器内気体の内部エネルギーに変換される。このことから、等積比熱 C_v を一定として (1) 式を用いると、内

部エネルギーの時間変化 dU は、次式となる。

$$\frac{d}{dt} \int C_v \rho T dV = G C_v \bar{T} + C_v W \frac{d\bar{T}}{dt} \quad (8)$$

エンタルピー $\delta H = G C_P \bar{T}$ であるので、 $C_P - C_v = R$ を用いてまとめることができる。さらに、 δq_2 は、銅線から得る熱量である。銅線の温度を T_c 、表面積を S_h 、銅線と気体との間の熱伝達率を h としたとき、 $\delta q_2 = h S_h (T_c - \bar{T})$ である。

以上をまとめると、容器内の内部エネルギーの時間変化は、次式のようになる。

$$C_v W \frac{d\bar{T}}{dt} = R \bar{T} G + h S_h (T_c - \bar{T}) \quad (9)$$

ここで放出過程における銅線内温度 T_c の時間変化に対して考察を行なう。等温化压力容器内に 300 K、700 kPa(abs) で気体を充填させたときの充填材と気体の熱容量を比較する。銅線、空気、水素の定積熱比熱がそれぞれ 0.379, 0.718, 1.01 kJ/(kg · K) であり、等温化压力容器内の銅線の充填率が 4% であることから、銅線と空気および銅線と水素との熱容量は、それぞれ 24 倍、150 倍の差がある。このことから、容器内気体の平均温度変化と比較して、銅線内温度 T_c の温度変化は非常に小さいことが考えられる。そこで、一連の放出過程において T_c は一定で、外気温 T_a と常に等しいと以後仮定する。

(4) 式および (5) 式を用いると、压力容器の下流にいかなる抵抗要素を接続しても、等温化压力容器内の圧力値を観測した結果から G_{exp} と G_{idm} を求めることができる。一方、絞りを通ずる質量流量 G_{ref} は、以下の式で示される。

$$G_{ref} = \begin{cases} S_e P \sqrt{\frac{\kappa}{R\bar{T}} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa+1}}} & \frac{P_a}{P} < \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \\ S_e P \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \frac{\kappa}{R\bar{T}} \left\{ \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}} & \frac{P_a}{P} > \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \end{cases} \quad (10)$$

以後、 G_{ref} を放出過程における質量流量の基準値として用いることとする。 S_e [m²] は、有効断面積である。通常、空気圧機器の流量特性値には音速コンダクタンスを使用するが、これは圧力と体積流量の関係を簡便に求めるための値であり、他の気体種に対して汎用性の高い特性値ではない。本論文では作動流体が水素と空気の場合における比較を行なう。そこで、説明の簡略化のために抵抗要素の抵抗値として有効断面積 S_e を用いることにする。また、放出時間 t [s] に関しては、次式で定義される圧力平衡時定数 T_p ¹⁵⁾

$$T_p = \frac{V}{S_e} \left(\frac{\kappa+1}{2} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{\kappa+1}{2\kappa R T_a}} \quad (11)$$

を用いて放出時間を無次元化する。

$$t^* = \frac{t}{T_p} \quad (12)$$

Fig. 2 Experimental setup for stop method

Table 2 Specification of experimental apparatus

	Sonic conductance [$\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{bar})$]
orifice-1	2.4 ($S_e = 11.5 \text{ mm}^2$)
orifice-2	0.51 ($S_e = 2.55 \text{ mm}^2$)
orifice-3	0.092 ($S_e = 0.46 \text{ mm}^2$)

3. 実験条件および実験装置

気体放出時の等温化压力容器内平均温度の時間変化をストップ法¹²⁾により測定した。試験回路を Fig. 2 に示す。試験回路は、気体供給源、圧力レギュレータ、等温化压力容器、真空ポンプ、弁および抵抗要素から構成されている。水素を充填してストップ法を実施する際には、空気の混入を防ぐために、水素を等温化压力容器に充填する前に真空ポンプで真空状態にしてから充填した。

継ぎ手などを含めた等温化压力容器の有効容積は $9.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ である。抵抗要素には、3 種類のオリフィスを用いた。あらかじめ ISO 6358 規格で求めた各オリフィスの有効断面積を Table 2 に示す。

具体的な試験手順はつぎのようになる。まず、気体を等温化压力容器内に充填し、等温化压力容器上流側の弁を閉じる。つぎにソレノイドバルブ (M30C-A44-TF, 金子産業(株)) を開いて放出を開始する。同時に、圧力センサ (PVL-10KB, 1.0 kHz, (株)共和電業/KH15, 1.0 kHz, 長野計器(株)) によって圧力データ収集も開始する。計測する時刻 t_1 に達したら、ソレノイドバルブを閉じ、容器内圧力が整定するまで待つ。収集した圧力データから時刻 t_1 , 圧力 P_1 , 整定した圧力 P_∞ を読み取る。また、大気温度 T_a を温度計から読み取る。シャルルの法則より、 t_1 における容器内平均温度 $\bar{T}_1$ を (13) 式から算出する。以上を繰り返すことで、放出過程における等温化压力容器内平均温度の時間変化を得ることができる。

$$\bar{T}_1 = \frac{P_1}{P_\infty} T_a \quad (13)$$

なお、ソレノイドバルブの有効断面積は、有効断面積が最も大きな Orifice-1 と比較しても 6 倍以上を確保しているため、本試験ではソレノイドバルブの影響を考慮しなくともよいと考えられる。

等温化放出法によって流量 G_{idm} を得る過程で、圧力の時間

微分は差分することで求める。差分はサンプリング時間 0.01 s で測定した圧力波形にカットオフ周波数が 50 Hz のローパスフィルタを施した後に、前後 4 点を用いる方法で行なった。

4. 実験結果

(11) 式から水素および空気使用時の T_p を求めると、Orifice-1 では、それぞれ 1.2 s, 5.0 s であった。同様に、Orifice-2 では 5.6 s (水素使用時) および 22.4 s (空気使用時) であり、Orifice-3 では、それぞれ 30.8 s (水素使用時), 124.2 s (空気使用時) であった。このことから、同じオリフィスを用いた場合の各気体種の T_p の比に対して、気体定数 R が支配的であり、また、 $\sqrt{R_{H_2}/R_{air}} = 3.8$ であることから、作動流体が水素の場合の放出時間は、空気の場合と比較して 3.8 倍ほど短いことが予想される。実験では、各オリフィスについて、容器内水素の圧力が 700 kPa(abs) から大気圧になるまでの放出時間は、空気における放出時間より、Orifice-1, Orifice-2, Orifice-3 では、それぞれ 3.95, 3.68, 4.09 倍短くなった。水素および空気使用時の最大放出速度は、Orifice-1 では、それぞれ 703, 197 kPa/s であった。同様に、Orifice-2 では、それぞれ 156, 80.9 kPa/s であり、Orifice-3 では、それぞれ 35.6, 26.2 kPa/s であった。

ストップ法による容器内平均温度の計測を行なった結果を Fig. 3 に示す。上図は大気圧力まで放出した際の圧力波形で、下段はストップ法で測定した容器内平均温度の結果を表す。一連の実験過程で大気温度が 292~318 K の範囲内で変動したために、大気温度と t_1 における容器内平均温度 $\bar{T}$ との差を百分率で示した。また、各条件において、全放出時間に対する容器内平均温度変化率の時間変化を比較するために、横軸は無次元放出時間 t^* とした。なお、温度変化に関しては 3 回の同じ条件による繰り返し実験を行ない、その RMS 誤差が 0.08 K 以内になることから、本実験が再現性を示すことを確認している。

Fig. 3 (a), (b) の各上段から、各オリフィスにおける無次元放出時間に対する圧力応答を比較すると、ほぼ同一の曲線で重なることがわかる。水素を Orifice-1 で放出した場合、本論文の全実験条件のうち放出時間が最短であり、放出速度は最大となる。放出直後に容器内平均温度が 1.7% まで低下した後に温度の回復が見られた。その他の場合に関しては、ある温度まで低下した後は、測定時間中には、温度の室温までの回復は見られなかった。また、同じオリフィスを用いた場合、水素は空気よりも放出速度が大きいかかわらず、温度変化率の最大値はほぼ変わらないことがわかった。このことを等温化压力容器からの気体放出速度で比較すると、放出速度が等しい場合には、水素における容器内温度変化は空気における場合よりも小さくなることがわかった。この容器内平均温度の変化に関しては、次章で考察を行なう。

5. 考察

容器内の温度変化率を連続的に表現するために、Fig. 3 で示

(a) Hydrogen

(b) Air

Fig. 3 Pressure response and temperature change with respect to dimensionless discharging time

した容器内平均温度変化率の実験結果を指数関数で近似した。その際、実験結果と近似式との RMS 値が $1.06 \times 10^{-3}\%$ 以下となるように定め、外気温が一定の条件に対して、容器内平均温度変化率の近似式を適用した。

この温度変化の近似式と圧力変化の実験値を用いて、(4) 式より質量流量 G_{exp} を算出した。水素使用時の Orifice-1 から Orifice-3 における、 G_{ref} に対する G_{exp} の RMS 値は、それぞれ 3.66×10^{-6} , 8.39×10^{-7} , 1.10×10^{-7} kg/s であった。

(a) Hydrogen

(b) Air

Fig. 4 Error between theoretical value of mass flow rate and calculated value with isothermal discharge method

一方、空気使用時では、それぞれ 4.26×10^{-5} , 7.51×10^{-6} , 8.21×10^{-7} kg/s であった。このことから G_{exp} は、基準値と良好な一致を示しており、以後 $G_{exp} \approx G_{ref}$ として取り扱う。

容器内に温度変化が生じる場合、等温化放出法から得られる流量 G_{idm} は、温度変化を考慮した質量流量 G_{ref} に対して誤差を生じる。誤差は、次式で表現される。

$$\begin{aligned} \frac{\text{Error} [\%]}{100} &= \frac{G_{ref} - G_{idm}}{G_{ref}} \approx \frac{G_{exp} - G_{idm}}{G_{exp}} \\ &= 1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{P}{T} \frac{dT}{dt} \bigg/ \frac{dP}{dt}\right)} \end{aligned} \quad (14)$$

無次元放出時間に対する計測誤差の変化を **Fig. 4** に示す。Fig. 4 より、各オリフィスの通過質量流量の計測誤差に対して、気体種による相違は大きく出ないことがわかる。Orifice-1 (最大放出速度：水素 703 kPa/s, 空気 197 kPa/s) では、放出直後の $0 < t^* < 0.17$ 区間では 3.0~8.5% の計測誤差を生じ、その後は放出終了時まで 3% 以内に収まった。同様に、Orifice-2 (最大放出速度：水素 156 kPa/s, 空気 80.9 kPa/s) では、放出直後 (水素： $0 < t^* < 0.09$, 空気： $0 < t^* < 0.08$ 区間) では 3.0~6.0% の計測誤差を生じ、その後は放出終了時まで 3% 以内に収まった。一方、Orifice-3 (最大放出速度：水素 35.6 kPa/s, 空気 26.2 kPa/s) では、全放出時間において計測誤差が 3% 以内に収まった。

Table 3 Average measurement error [%]

	Hydrogen	Air
orifice-1	1.24	1.11
orifice-2	0.53	0.71
orifice-3	0.39	0.56

なお、計測誤差の時間平均を求めると、**Table 3** に示すように水素および空気において 1.3% 以下となり、高精度な測定が実現できたことが明らかになった。

容器内平均温度変化に関して考察する。Fig. 4 に示すように、同じオリフィスを用いた場合は、気体種にかかわらず温度の低下率に大きな差は見られなかった。例として、Orifice-2 のオリフィスを用いた場合を考える。作動流体が水素と空気の場合では、圧力平衡時定数がそれぞれ 5.59 s および 22.8 s と 4.1 倍の差がある。一方、容器内平均温度の変化は、どちらも外気温から 1% 程度の低下であり、これは約 3 K の低下に相当する。このことから、容器内平均温度低下の現象を説明するためには、圧力低下速度 dP/dt だけでなく容器内気体のエネルギーの観点から考察する必要がある。

ここで、銅線と気体との間の熱伝達率 h を考える。等温化压力容器内に充填されている銅線は、実際は、容器内で重なり合っており、規則正しく整列はされていない。しかしながら、等温化压力容器内からの気体放出時における気体-充填材間の熱伝達を簡略に説明するために、気体放出時に容器内気体は銅線に直行して流れ、銅線は千鳥格子状に配列していると仮定する。10 < Re < 40000 の範囲で流体が千鳥格子状に配列している管群を通過するときのヌッセルト数 Nu は、Colborn¹⁶⁾によって、レイノルズ数 Re とプラントル数 Pr を用いて、

$$Nu = 0.33 Re^{0.6} Pr^{1/3} \quad (15)$$

の関係式で示される。

レイノルズ数は、質量流量 G と代表直径 D を用いると、

$$Re = \frac{4G}{\mu\pi D} \quad (16)$$

と示すことができ、水素および空気放出時における各ヌッセルト数の比を考えると、代表直径 D は打ち消しあうために結局次式で求めることができる。

$$\frac{Nu_{H_2}}{Nu_{air}} = \left(\frac{G_{H_2}/\mu_{H_2}}{G_{air}/\mu_{air}} \right)^{0.6} \left(\frac{Pr_{H_2}}{Pr_{air}} \right)^{1/3} \quad (17)$$

さらに、ヌッセルト数の定義より、ヌッセルト数と熱伝達率の関係は、代表長さ L を用いると、

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (18)$$

である。ここで Fig. 3 より、Orifice-2, 3 を使用した場合、無次元放出時間に対する容器内圧力と容器内平均温度の変化

は、水素と空気によらずほぼ等しいと考えられる。したがって、熱伝達率の比は、次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{h_{H_2}}{h_{air}} &= \left(\frac{G_{H_2}/\mu_{H_2}}{G_{air}/\mu_{air}} \right)^{0.6} \left(\frac{Pr_{H_2}}{Pr_{air}} \right)^{1/3} \frac{\lambda_{H_2}}{\lambda_{air}} \\ &\approx \left(\frac{\mu_{air}\sqrt{R_{air}}}{\mu_{H_2}\sqrt{R_{H_2}}} \right)^{0.6} \frac{\lambda_{H_2}}{\lambda_{air}} = 5 \end{aligned} \quad (19)$$

(19) 式より、同じ抵抗要素を用いた場合では、水素-銅線間の熱伝達率は、同じ無次元放出時間における空気-銅線間の熱伝達率の 5 倍になると考えられる。このことから、水素-銅線間で熱交換が十分に行なわれるために、空気放出時と比較しても容器内平均温度変化に大きな差が生じないと考察される。

6. 結 論

(1) 空気圧機器の流量特性計測用に設計された等温化压力容器を用いて、水素における等温化放出法による流量特性計測を行なった。気体の放出速度が等しい場合、水素放出時における容器内平均温度変化は、空気放出時における容器内平均温度変化よりも小さいことがわかった。

(2) 等温化放出法によって得られる流量の計測誤差を検出した。その結果、同じ抵抗要素に対する作動流体が水素と空気の場合では、流量の計測誤差はほぼ同程度となることがわかった。本論文で使用した抵抗要素のうち、全放出時間において計測精度を 3% 以内に収められたとき、水素の最大放出速度が 35.6 kPa/s および空気の最大放出速度が 26.2 kPa/s であった。

(3) 等温化压力容器から水素と空気をそれぞれ放出する過程における、内部エネルギー変化を比較した。ヌッセルト数とレイノルズ数・プラントル数との関係から、同じ抵抗要素を用いた場合の水素-銅線間の熱伝達率は、空気-銅線間の熱伝達率の 5 倍になると予測される。このことから、水素と空気の放出速度が等しい場合、水素放出時における容器内平均温度変化は、空気放出時よりも小さくなると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 経済産業省：「水素利用社会システム構築実証事業」における水素ハイウェイプロジェクトの運用開始について、資源エネルギー庁 (2010)
- 2) 経済産業省：「水素利用社会システム構築実証事業」における水素タウンプロジェクトの運用開始について、資源エネルギー庁 (2011)
- 3) IEC 60534: Industrial-process control valves, International Electrotechnical Commission (2001)
- 4) JIS B 2005: 工業プロセス用調節弁, 日本規格協会 (2005)
- 5) C. Long and J. Guan: A method for determining valve coefficient and resistance coefficient for predicting gas flowrate, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **35**-6, 1162/1168 (2011)
- 6) ISO 6358: Pneumatic fluid power — Components using compressible fluids — Determination of flow-rate characteristics, International Organization for Standardization (1989)
- 7) JIS B 8390: 空気圧-圧縮性流体用機器-流量特性の試験方法,

日本規格協会 (2000)

- 8) 香川, 川嶋, 藤田, 田中, 榎和: 等温化压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)
- 9) K. Kawashima, T. Kagawa and T. Fujita: Instantaneous Flow rate Measurement of Ideal Gases, Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control, **122-1**, 174/178 (2000)
- 10) 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)
- 11) 王, 蔡, 川嶋, 香川: 準等温化压力容器を用いた空気圧機器の流量特性計測に関する研究: (熱伝達を考慮した等温化放出法の温度補償の提案), 日本フルードパワーシステム学会論文集, **37-2**, 15/23 (2006)
- 12) 日本機械学会編: 機械工学便覧—基礎編—熱工学, 日本機械学会 (2006)
- 13) 浅野, 香川, 竹内, 池田: 異種ガスをを用いた抵抗要素の流量特性, 計測自動制御学会産業論文集, **8-9**, 76/81 (2009)
- 14) 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)
- 15) 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—空気圧抵抗容量系の絞りが閉塞状態を伴う場合のステップ応答, 油圧と空気圧, **19-4**, 306/311 (1988)
- 16) A.P. Colburn: A method of correlating forced convection heat-transfer data and a comparison with fluid friction, Inter. J. Heat and Mass Transfer, **7-12**, 1359/1384 (1964)

香川 利 春 (正会員)

1974年東京工業大学制御工学科卒業。同年北辰電気製作所入社, 76年東京工業大学助手, 講師, 助教授を経て, 現在同大学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。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。工学博士。

[著 者 紹 介]

大 川 陽 一

2009年東京工業大学大学院生命理工学研究科生物プロセス専攻修士課程修了。同年同大学院総合理工学研究科メカノマイクロ工学専攻博士課程入学, 現在に至る。日本機械学会, 日本フルードパワーシステム学会の学生会員。

尹 鍾 皓

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。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。博士(工学)。

中 村 善 也

1997年岡山大学工学部機械工学科修士課程修了。同年KYB(株)基盤技術研究所に入社。2001年岡山大学博士課程後期修了を経て, 現在同社基盤技術研究所主任研究員。流体機器製品の研究開発に従事。日本フルードパワーシステム学会の会員。博士(工学)。