

2008年夏 TIC インターンシップ レポート

風量測定装置の校正

筑波大学

第3学群工学基礎学類3年

小野奈保子

第3学群工学基礎学類3年

田中大二郎

監修

ツクバリカセイキ 株式会社

目次

1	本実験の背景	3
2	実験目的	3
3	関連規格	3
4	実験準備	4
4 - 1	使用設備	5
5	実験原理	
5 - 1	ソニックノズル	6
5 - 2	入り口ノズルと風量計ノズル	6
6	予備実験	
6 - 1	実験方法	8
6 - 2	結果	8
6 - 3	考察	8
7	本実験	
7 - 1	実験方法	9
7 - 2	結果	10
7 - 3	考察	11
7 - 4	改善点	13
8	最後に	13

1 本実験の背景

近年、中東アジアの経済発展による自動車販売数の増加により、自動車エンジンの排気量等の研究・開発として風量測定装置の需要は増加傾向にある。ツクバリカセイキでは、この風量測定分野に特化した装置の製造、販売をおこなっている。そのような中、ツクバリカセイキには、代表的な販売品の中に風量校正装置であるマルチノズル風量測定装置がある。

ツクバリカセイキで販売している風量測定装置が、各企業が風量計測に用いるワーキングスタンダードとしての基準を示しているかを確認する。そのことが今回の実験の目的である。以上のことを以って、次の項に移る。それぞれの評価は次の項で示す規格に準じるものとする。

2 実験目的

風量測定装置で示される風量値と実際に流れる風量が正しく反映されているのかを、ファン風量測定装置のノズルと現場校正用の入り口ノズルの二つをソニックノズルを用いて校正し、確認することを目的とする。

3 関連規格

今回の実験では送風機、風量基準については、以下の工業規格に沿っている。

- ・ 送風機性能試験方法 JIS B 8330
- ・ JCT20810 技術的要求事項適用指針(流量・流速/気体流量)

目的	機器名	メーカー	型番、仕様	個数
流量計測	SV メータ (ソニックノズル)	(株)オーバル	3.47L - 11	1 個
			13.89 L - 46	1 個
			55.56L - 30	1 個
気圧計測	デジタル気圧計	setra	M370 800 ~ 1100mbr	1 台
			SN.162632	
差圧計測	差圧変換器	ローズマウント社	1151DP	2台
			0 ~ 1250Pa ± 2.0 Pa	
温度計測	デジタル・マルチメータ	岩通計測(株)	VOAC7513	1台

図1 実験で使用する校正基準機器

校正基準機器は、各々ワーキングスタンダードとしての精度を満たしている。

風量校正のソニックノズルについては以下の規格証明を基準としている。

- ・ 構成用ソニックノズル検査成績書 FF01-001(日付：平成 11 年 12 月 3 日発行者：(株)オーバル)

計量流体：空気 大気圧：1009～1024hPa、温度：23.0±0.5、湿度：45±5%RH

標準器：定積層 VE-6001

製造番号	公称値	実流量	Ds		
	L/s	L/s	mm		
3.47 L-11 (ソニックノズルC)	3.472	3.474	4.739	0.9891	1.213
13.89 L-46 (ソニックノズルB)	13.889	13.90	9.457	0.9923	1.452
55.56 L-30 (ソニックノズルA)	55.556	55.56	18.883	0.9950	1.946

図2 ソニックノズルの検査成績

記) 実流量値は、大気圧：1013.25hPa〔abs〕、温度：23.0、湿度50%RHに換算した値です。Ds(推定スロート径)、値及び値は、大気圧：1013.25hPa、温度：23.0、湿度50%RHの条件における値です。

4 実験準備

ツクバリカセイキ設計・製作のF-401 マルチノズルファン風量測定装置の補助送風機および電動ダンパーを取り外し、代わりに手動絞リ弁、ソニックノズル、および真空ポンプを取り付けた。

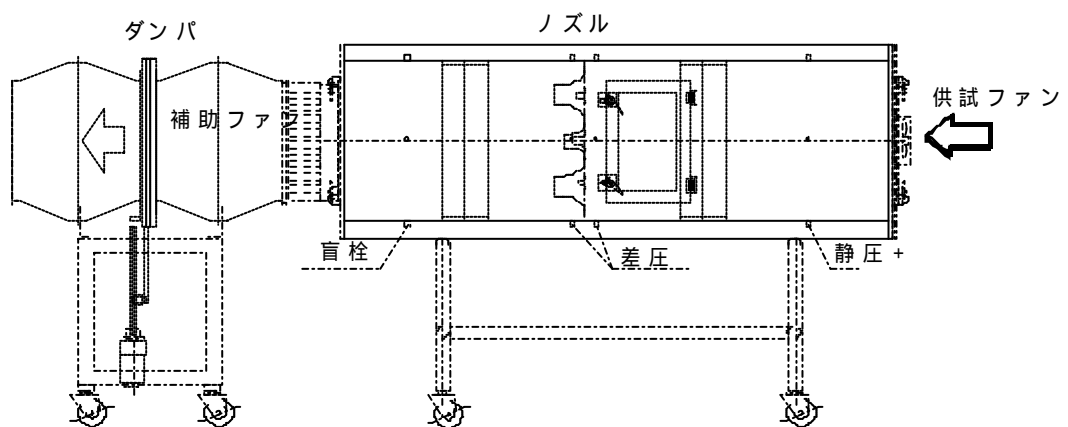


図3 マルチノズルファン風量測定装

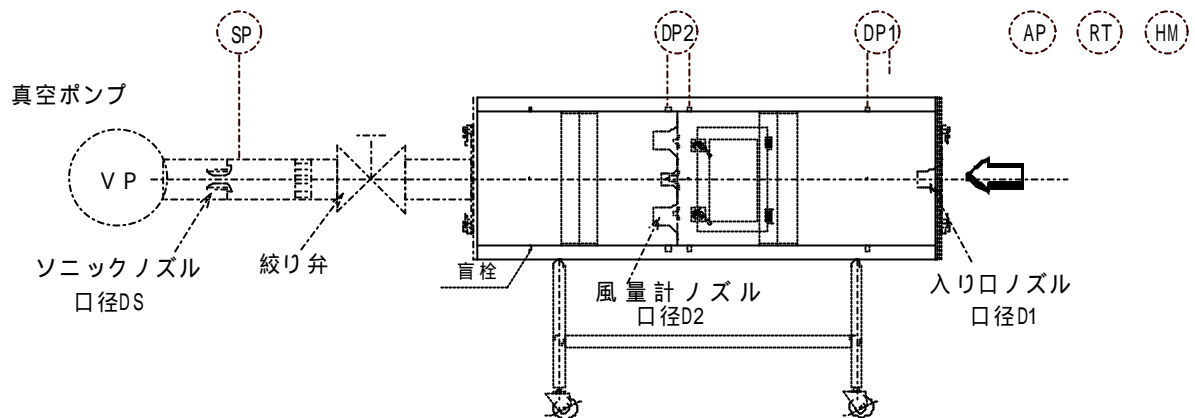


図4 校正システム図

本実験で使用するノズルはマルチノズルファン風量測定装置の入り口に取り付ける現場校正用ノズル、風量測定装置の中央に取り付けてある風量計ノズル（以下、入り口ノズル）そして絞り弁と真空ポンプの間に取り付けてあるソニックノズルの計3種類である。入り口のノズルは口径 12, 17, 24, 40, 60 mmの計5つあり、実験ごとに目的のノズルを取り付けて使用した。風量計ノズルは口径 12.15, 17, 24, 40 mmが各1つずつ、60 mmが4つ、計8つあり、実験ごとに目的のノズルの栓を開いて使用した。ソニックノズルはA - 18.883 mm、B - 9.457 mm、C - 4.739 mmの3つあり、風量計ノズルと同じく、実験ごとに目的のノズルを取り付けて使用した。F - 411 風量演算システムを用いて室内の温度 T_1 ()、湿度 HM (%)、入り口ノズルの入り口と出口の差圧=静圧 dP_1 (Pa)、風量計ノズルの入り口と出口の差圧 dP_2 (Pa)を測定した。デジタル気圧計で室内の大気圧(真空を基準とした絶対圧) AP_1 (Pa)とソニックノズルの入り口気圧 SP (Pa)を測定した。デジタル・マルチメータVOC A7513でソニックノズル入り口部分の管内温度 T_s ()を測定した。

4 - 1 使用設備

ファン風量測定装置 図5参照

温度湿度気圧モーター 図6参照

ソニックノズル 図7参照

真空ポンプ 図8参照

デジタル圧力計 図9参照



図5 ファン風量測定装置



図6 温度湿度気圧モーター



図7 ソニックノズル

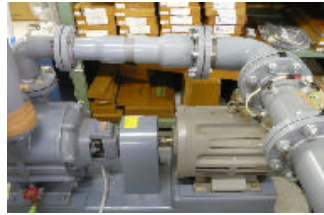


図8 真空ポンプ



図9 デジタル気圧計

5 実験原理

5 - 1 ソニックノズル

気体が流れるソニックノズルの上流側と下流側の圧力差を大きくすると、上下流の圧力比 = 下流 / 上流 がある値 臨界圧力 以下になると、スロート部分を通る気体の流速は音速に達するので下流の状態に関係なくなる。いったん音速に達した後は、圧力差が大きい限り、スロート部分を通る気体の流速はずっと音速である。つまり、下流部の変動に関係なく、任意で一定流量を発生させることが可能なので高度な流量計測が可能である。また、理論的には、ソニックノズルを流れる気体の質量流量は、気体のスロート部分の音速、空気密度、断面積によって求めることができる。しかし、実際にはソニックノズルの流出係数を考慮に入れるほか、上流側の圧力、温度を測定し正確な空気密度を、求める必要がある。

ソニックノズルは、圧力 101325Pa、温度 23 、湿度 60% で校正されることになっているが、ここでは圧力 SP (Pa)、温度 T_s ()、湿度 HM (%) とする。

$$m_3 : \text{質量流量 (kg/s)} \quad m_3 = Q_t \cdot Cd = A \cdot Cd \cdot Cc \cdot SP \cdot \sqrt{\frac{N}{R \cdot T \cdot Z}}$$

D_s : ソニックノズル口径 (m)

T : 温度 (K)

$$T = T_s + 273.15$$

R : 気体定数 = 8.31451

A : スロート面積 (m^2)

$$A = \frac{P}{4} \cdot D_s^2 \cdot (1 + 1.6 \cdot 10^{-5}) \cdot (T - 296.15)^2$$

C d : 流出係数 $Cd = a - \frac{b}{\sqrt{Re}}$

Re : レイノルズ数 $Re = \frac{4 \cdot Q_t}{p \cdot D_s \cdot m}$

μ : 空気粘度 (Pa·s)

$$m = \left\{ 12.185 + 0.03205 \cdot (T - 296.16) + 0.0175 \cdot \left(\frac{SP}{101325} - 1 \right) \right\} \cdot 10^{-6} / 0.671971$$

C c : 入り口臨界流れ定数 $Cc = \left[g \cdot \left(\frac{2}{g+1} \right)^{\frac{g+1}{g-1}} \right]^{0.5}$

: 空気比熱比 $g = \frac{Cp}{Cv}$

C p : 湿り空気 定圧比熱 (kJ/K·kg) $Cp = (1-x) \cdot Ca + x \cdot Cw$

C v : 湿り空気 定積比熱 (kJ/K·kg) $Cv = (1-x) \cdot \frac{Ca}{g_a} + \frac{Cw}{g_w}$

C a : 乾燥空気の定圧比熱 = 1.007

C w : 水蒸気の定圧比熱 = 1.890

a : 乾燥空気の比熱比 = 1.402

w : 水蒸気の比熱比 = 1.332

x : 水蒸気の含有モル分率 $x = \frac{HM}{100} \cdot f \cdot \frac{Ps}{SP}$

f : 分圧係数 $f = 1.00062 + 3.14 \cdot 10^{-8} + SP \cdot 5.6 \cdot 10^{-7} \cdot Ts^2$

P s : 飽和蒸気圧 (Pa)

$$Ps = \exp(1.2811805 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1.9509874 \cdot 10^{-2} \cdot T + 34.04926034 - \frac{6353.6311}{T})$$

N : モル質量 (Kg/mol) $N = (1-x) \cdot Na + x \cdot Nw$

Na : 乾燥空気のモル質量 (Kg/mol) = 0.0289634

Nw : 水蒸気のモル質量 (Kg/mol) = 0.0180150

Z : 圧縮係数 $Z = 1 + \frac{SP \cdot Vr}{R \cdot T}$

V r : ビリアル係数 (m³/mol)

$$Vr = -1.19 \cdot 10^{-5} + (-4.1 \cdot 10^{-6} + 1.19 \cdot 10^{-5}) \cdot \frac{(T - 280)}{(320 - 280)}$$

Qt : 理論流量値 (kg/s)

$$Qt = A \cdot Cc \cdot SP \cdot \sqrt{\frac{N}{R \cdot T \cdot Z}}$$

5 - 2 入り口ノズルと風量計ノズル (i = 1 : 入り口ノズル, 2 : 風量計ノズル とする)

mi : 質量流量 (kg/s)

$$mi = ei \cdot Ci \cdot \frac{P}{4} \cdot Di^2 \cdot \sqrt{2 \cdot rai \cdot dPi}$$

Di : ノズル口径 (m)

AP1 : 大気圧 (Pa)

AP2 : 気圧 (Pa)

dPi : 差圧 (Pa)

T : 温度 (K)

$$AP2 = AP1 - dP1$$

$$T = T1 + 273.15$$

Ps : 飽和蒸気圧 (Pa)

$$Ps = \exp\left(\frac{17.483 \cdot T1}{239.78 + T1} + 6.4147\right)$$

Pv : 水蒸気圧 (Pa)

$$Pv = Ps \cdot \frac{HM}{100}$$

HM : 湿度 (%)

ai : ノズル入口空気密度 (kg/m³)

$$ra = \frac{APi - 0.379 \cdot Pv}{287 \cdot T}$$

Rdi : 圧力比

$$Rdi = 1 - \frac{dPi}{APi}$$

: 空気比熱比 = 1.4

i : 空気膨張係数

$$ei = \left(\frac{k \cdot Rdi^{\frac{2}{k}} \cdot (1 - Rdi^{\frac{k-1}{k}})}{(k-1) \cdot (1 - Rdi)} \right)^{0.5}$$

Rei : ノズルレイノルズ数

$$Rei = \frac{0.95 \cdot ei \cdot Di \cdot \sqrt{2 \cdot dPi}}{rai}$$

i : 空気の動粘度 (m²/s)

$$ni = \frac{(17.1 + 0.048 \cdot T1) \cdot 10^{-6}}{rai}$$

Ci : 流量係数

$$Ci = 0.9986 - \frac{6.688}{Rei^{0.5}} + \frac{131.5}{Rei}$$

Qi : ノズル入口体積流量 (m³/min)

$$Qi = \frac{60 \cdot mi}{rai}$$

6 予備実験

本実験では、装置の2点(入り口、風量計)のノズルとソニックノズルの合計3点でノズルに流れる質量流量(kg/s)を比較することにより、装置のノズルが風量測定をおこなうにあたって正しい値を示すかを確認する。

本実験で、3点間のノズルに流す質量流量を計算により見積もり、以下の予備実験を実施して装置に風量の漏れ、質量流量の計算に誤りがないかを確認した。

予備実験では、ソニックノズル(C)と風量計ノズル(12、17)を用いる。風量計ノズルの測定範囲については計算で求めた理論値と比較して装置に風量の漏れが無いか確認する。

以下、予備実験の手順、結果を示す。

6 - 1 実験方法

ファン風量測定装置の風量計ノズル(12 or 17)を開き、ソニックノズルを取り付けた塩ビ管でファン風量測定装置、ソニックノズル(C)と真空ポンプを繋いだ。真空ポンプで空気を吸い込むことにより、二つのノズルが空気を吸い込む。温度湿度気圧モーターを用いることにより、室内の温度、湿度、気圧を測定し、デジタル圧力計で管内の圧力を測定してソニックノズルと風量計ノズルを通過する質量流量値を計算した。

・計算で出した計測予想値

差圧最大のときを 1008Pa, 差圧最低のときを 100Pa と予想し理論値を計算した。

種類	差圧最低 Pa	差圧最大 Pa	風量 最小値	風量 最大値	風量 最小値	風量 最小値
	Pa	Pa	m ³ /min	m ³ /min	g/s	g/s
12	100	1008	0.08760	0.27813	1.6820	5.3401
17	100	1008	0.17581	0.55819	3.3756	10.7172

図10 AMCA ノズルの測定範囲 (標準空気)

種類	最低気圧	大気圧	風量 最小値	風量 最大値	風量 最小値	風量 最大値
	kPa	kPa	L/s	g/s	g/s	g/s
C	60.00	100.80	3.52	4.226013	2.5155	4.2260

図11 ソニックノズルの測定範囲

6 - 2 実験結果

測定 No.	風量計ノズル	ソニックノズル	風量比	ノズル流量
	風量 m ² kg/s	風量 m ³ kg/s	m ² /m ³	校正値%
*-12-C1	0.00396317	0.00405741	0.97677334	2.32
*-12-C2	0.00327670	0.00335467	0.97675626	2.32
*-17-C1	0.00408685	0.00407870	1.00199823	-0.20
*-17-C2	0.00408685	0.00407870	1.00199823	-0.20

図 1 2 実際の計測で出した各ノズルの質量流量値

6 - 3 考察

・実験の結果より、12 のノズルを用いた時の校正値に 1%以上の誤差が出たが、17 のノズルではかなり高い精度の校正値が出たので、計算で求めた計測予想値とほぼ一致できた。

・今回は風量計ノズルの校正だけであったが、入り口ノズルを取り付けて 3 点間における校正を実施しても高い精度の校正値が出せるのではないかと思われる。

・口径の小さいノズルほど、口径の読み取り誤差が最終結果の誤差に大きく影響する。

12 のノズルは測定誤差が一番出やすいので、本実験を実施する前に口径を測定する必要がある。また装置に風量の漏れが無いが随時、確認する必要がある。

測定の結果、ノズル 12 は 12 . 15 であった。

7 本実験

7 - 1 実験方法

AMCA 風量計ノズルとソニックノズルの測定範囲 (図 1 3 ~ 1 5 参照) より、入り口ノズル-風量計ノズル-ソニックノズルのそれぞれの組み合わせ (12 - 12 . 15 - C、17 - 17 - C、24 - 24 - B、40 - 40 - A , B、60 - 60 - A の計 6 種類) に対し、絞り弁を開閉することでソニックノズル圧力を変化させ、異なる 2 つの風量を発生させて計測を行った (尚、40 - 40 - B は 1 回だけ測定した)。

種類	実流量	流量	
		最低気圧 (80.00kPa)	大気圧 (101.30kPa)
	L/s	g/s	g/s
C	3.47	3.34	4.23
B	13.90	13.35	16.91
A	55.56	53.38	67.59

図 1 3 ソニックノズルの測定範囲 (8 0 k P a - 1 0 1 . 3 k P a)

種類	流量		ソニック ノズル
	差圧低 (108.51Pa)	差圧大 (1085.07Pa)	
	g/s	g/s	
12	1.75	5.54	C
17	3.52	11.12	C
24	7.01	22.16	B,C
40	19.47	61.56	A
60	43.80	138.51	A

図14 風量計ノズルの測定範囲 (108.51Pa - 1085.07Pa)

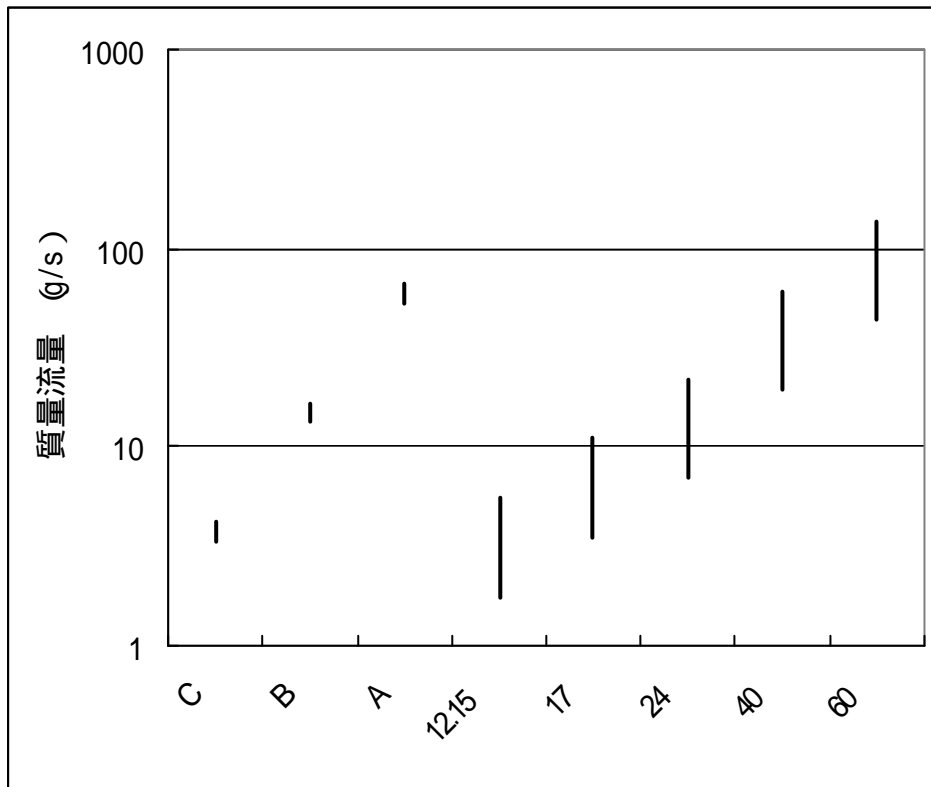


図15 ソニックノズルとAMCAノズルの設定範囲

7 - 2 実験結果

測定 No.	質量流量 (kg/s)			風量比		誤差 (%)	
	入り口ノズル	風量計ノズル	ソニックノズル				
	m1	m2	m3	m1/m3	m2/m3	入り口ノズル	風量計ノズル
12-12-C1	0.00402	0.00402	0.00402	1.00200	1.00019	-0.20	-0.02
12-12-C2	0.00342	0.00341	0.00343	0.99662	0.99481	0.34	0.52
17-17-C1	0.00404	0.00407	0.00404	1.00085	1.00593	-0.09	-0.59
17-17-C2	0.00345	0.00346	0.00344	1.00173	1.00535	-0.17	-0.53
24-24-B1	0.01614	0.01608	0.01602	1.00747	1.00385	-0.75	-0.39
24-24-B2	0.01291	0.01291	0.01284	1.00572	1.00587	-0.57	-0.59
40-40-B	0.01629	0.01620	0.01623	1.00380	0.99786	-0.38	0.21
40-40-A1	0.06203	0.06161	0.06211	0.99868	0.99194	0.13	0.81
40-40-A2	0.05204	0.05169	0.05207	0.99932	0.99262	0.07	0.74
60-60_1-A1	0.06491	0.06471	0.06466	1.00379	1.00076	-0.38	-0.08
60-60_2-A1	0.06489	0.06445	0.06468	1.00325	0.99654	-0.33	0.35
60-60_3-A1	0.06489	0.06476	0.06475	1.00221	1.00017	-0.22	-0.02
60-60_4-A1	0.06478	0.06467	0.06475	1.00046	0.99884	-0.05	0.12
60-60_1-A2	0.05257	0.05246	0.05242	1.00280	1.00060	-0.28	-0.06
60-60_2-A2	0.05255	0.05226	0.05245	1.00203	0.99648	-0.20	0.35
60-60_3-A2	0.05268	0.05251	0.05233	1.00683	1.00347	-0.68	-0.35
60-60_4-A2	0.05254	0.05235	0.05238	1.00318	0.99948	-0.32	0.05

図 1 6 A M C A ノズルと現場校正用ノズルの風量校正試験結果

A 1 はほぼ大気圧、A 2 は絞り弁を閉じて、A 1 の 1 5 ~ 2 0 % 程度減圧した状態で測定した。

校正結果は、ソニックノズル風量測定値の ± 1 % 以内となった。

7 - 3 考察

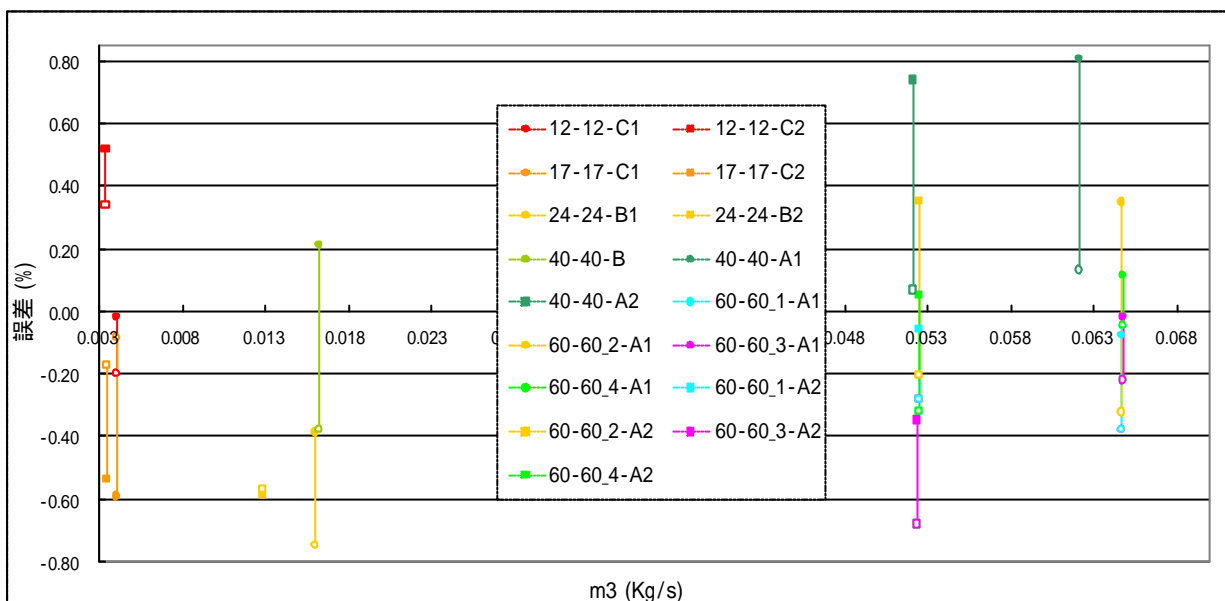


図 1 7 ソニックノズル質量流量に対する誤差

白抜きの点が現場校正用入り口ノズルの誤差、塗りつぶしの点が風量計ノズルの誤差を示す。

) 全体的な風量に対する誤差に偏りは見られないが、ノズル別で見ると、12、24、60_3のノズルで風量を変化させたとき、誤差に変化が見られる。

本試験では同じ入り口ノズルを使用して風量を変化させて測定するとき、室内温度を更新することなく続けて測定をしたが、絞り弁の開閉と圧力を安定させるのに時間が掛かるなど、ABC1 測定後 ABC2 を測定するまでに時間差が生じた場合、室内温度と管内温度に大きな差が生じ、正確な値が求められなかったと考えられる。

測定 No.	T1 - Ts (X1)	T1 - Ts (X2)
12-12-C	1.0	1.9
17-17-C	-0.2	-0.2
24-24-B	0.1	0.9
40-40-A	0.3	0.6
60-60_1-A	0.3	0.3
60-60_2-A	0.3	0.3
60-60_3-A	-1.4	0.1
60-60_4-A	-0.2	-0.1

図 1 8 室内-管内温度差

管内温度と室内温度の計測が1 違ってくると、12 のノズルで考えると結果の質量流量 (約 4 g/s) に対して、校正値に約 0.8%、つまり質量流量に約 32mg/s の誤差が生じるこ
 とが確かめられるので、口径が小さくなるほど誤差が見逃せなくなる。

) 測定精度

$$m_i = e_i \cdot C_i \cdot \frac{P}{4} \cdot D_i^2 \cdot \sqrt{2 \cdot r_{ai} \cdot dP_i}$$

より、最大誤差は

$$\left| \frac{dm_i}{m_i} \right| \leq \left| \frac{de_i}{e_i} \right| + \left| \frac{dC_i}{C_i} \right| + \left| \frac{dp}{p} \right| + 2 \left| \frac{dD_i}{D_i} \right| + 0.5 \left\{ \left| \frac{dr_{ai}}{r_{ai}} \right| + \left| \frac{ddP_i}{dP_i} \right| \right\} \quad (1)$$

で見積もることができる。

| / | < 0 . 0 0 0 0 2 < 0 . 0 0 0 0 5 / 3 . 1 4 1 5
 | D/D | < 0 . 0 0 0 5 < 0 . 0 0 5 / 1 2 . 0 0
 | d P i / d P i | < 0 . 0 0 0 5 (1 2、1 7)
 | / |、| C i / C i |、| a / a | = ?
 | m i / m i | < 0 . 0 0 1 とすると

有効数字	3 桁	4 桁	5 桁
m 1 (Kg/s)	0.00402	0.004024	0.0040236
精度	0.001	0.0001	0.00001

図 1 9 12-12-C1 の m 1 の精度

) 風量計 60 ノズル

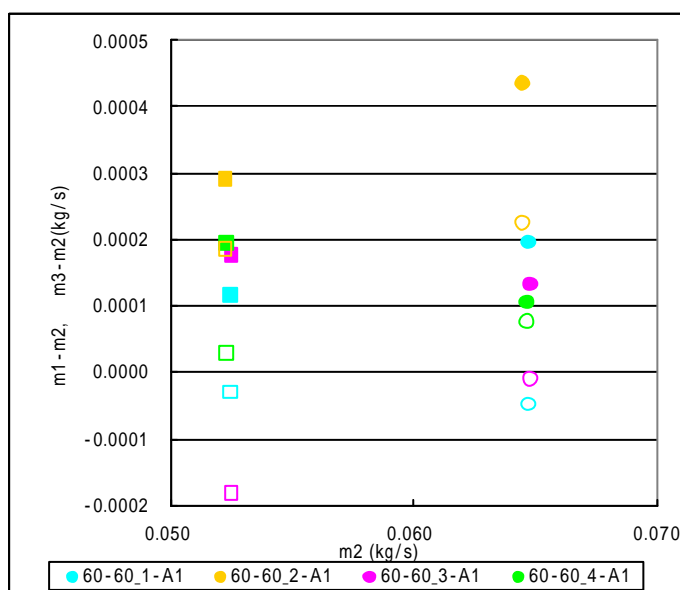


図 2 0 風量計ノズル質量流量に対する流量差

6 0_2 のノズルがもっとも誤差が大きく、ノズルの口径のみに誤差があるとする、最大で + 0 . 1 mm (0 . 1 6 %) の誤差があると考えられる。ノズルの均一さを調べるためには、試験において風量を少なくとも 2 回は変化させる必要があった。

7 - 4 改善点

- ・ ノズルの口径に対する誤差を正確に測定する必要がある。 12 の風量計ノズルで 0.15mm の誤差があったように他のノズルでも口径に微妙な誤差があるのではないかと考えられ、それによって校正値の誤差を修正できるはずである。
- ・ 今回の実験で使用した真空ポンプは水を使うため、塩ビ管の接合が充分でないと水が漏れ出すため、接合をしっかりとすることが必要であった。また、音が激しいのでポンプの後方部に車のエンジンのマフラーように塩ビ管に細工を施して防音する必要があった。
- ・ 真空ポンプから塩ビ管を通してソニックノズル前のデジタル気圧計の部分に水が逆流する可能性があるため、塩ビ管の形状を工夫する必要があった。

8 最後に

今回のツクバリカセイキでのインターンシップでは、中山社長が中心となり流体の基礎実験や企業の仕組みに触れることができ興味深いものでした。普段学校で学んでいるものとは異なっていて新鮮であったと思います。

中山社長始め、お気を使って和やかな雰囲気をつくってくださった安藤さん、インターンシップ全体が順調に進むよう中山社長や安藤さんとの遣り取りを温かく見守ってくださった佐藤さん、仕事の合間をぬって実験の準備を手伝ってくださった清水さん、林さん、皆様のおかげで無事実験を終えることができ、大変感謝しております。