ガラス・ファイバ・ダクト直管部、曲管部および 分岐部の気流および音響特性について

正会員 板 本 守 正*
正会員 塩 川 博 義**

1. 緒 言

ガラス・ファイバ・ダクトは、米国で開発され、約25年前から我が国でも用いられるようになった。最近では年間数百件以上の各種用途の建築に用いられており、当初の博覧会用パビリオンのみでなく、コンサート・ホールなど大規模な建築にも広く採用されている。

ガラス・ファイバ・ダクトは、従来の鉄板ダクトに比較して、消音、断熱、気密、軽量など多くの特質を有する。しかしながら、ダクト側壁が軽量のガラス・ファイバで構成されているため、ダクト内の音響減衰は大きい。また、ダクト壁の遮音量が小さく、ダクト内から外へ、また、ダクト外から内へと容易に音が透過する。

こうした特質に着目した研究も、勝田ほか¹⁾、長友ほか²⁾によって行われてきたが、われわれは、ガラス・ファイバ・ダクト系すべてのエレメントについて、それらの気流および音響特性を明らかにし、ガラス・ファイバ・ダクト系の設計が合理的に行えるための基礎資料を得ることとした³⁾⁻⁹⁾。

本報告では、前述の目的の一部として、ガラス・ファイバ・ダクトの直管部、曲管部および分岐部を取り上げ、それらの損失圧力、音響減衰および直管側壁の遮音特性を明らかにする。

2. 供試体の種類

供試体を図-1に示す。供試体は円形断面直管部3種 (Type A)、正方形および長方形断面直管部8種 (Type B)、円形断面曲管部15種 (Type C)、正方形および長方形断面曲管部23種 (Type D)、円形断面分岐部6種 (Type E)、正方形および長方形断面分岐部17種 (Type F) である。なお、円形断面直管部200φおよび300φはガラス・ヤーン有無の音響特性を検討するために2種類ある。また、曲管部および分岐部は、ガイドベーン付きがあり (Type D-3, F-4 および F-9)、特に、Type D-3 では、ガラスウール製ガイドベーンが1種、アル

ミニウム製ガイドベーンが2種あり、後者はベーンの数
が少なく長さが長いものを L、数が多く長さが短いものを S として区別する。分岐部は、すべてアルミニウム製ガイドベーンである。

ダクトの側壁を構成するガラス・ファイバは、厚さ25 mm、密度60 kg/m³で、外面は0.08 mm厚のアルミ箔を貼りつけ、ダクトの内表面は、円形断面では消石灰とボンドとを混合したものを吹き付け、正方形および長方形断面ではガラス・ファイバの表面を焼き付け処理してある。ガラスウール製ガイドベーンの密度および表面

Type A : Round section ducts

Type B : Rectangular section ducts

図-1 供試体の種類 (次頁につづく)

本論文は日本建築学会、空気調和・衛生工学会および空気調和・冷凍連合講演会において発表した文献3)および5)~9)の内容を再検討し、まとめ直したものである。

* 日本大学 教授・工博

** 日本大学 助手・工修

(昭和63年6月10日原稿受理)

Type	Duct diameters (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)
C-1	100	124	80	40
C-2	200	274	174	62
C-3	200	274	174	62
C-4	300	311	206	169
C-5	300	311	206	169

Type C : Round section elbows

Type	Duct diameters WxH(mm)
D-1, D-2, D-4	200x200, 300x300, 600x600, 1000x300
D-3	200x200, 300x300, 600
D-5	300x300, 600x600

Type D : Rectangular section elbows

Duct diameters(mm)					
E-1			E-2		
0	1	2	0	1	2
200	200	150	200	150	150
250	250	200	250	200	200
300	300	250	300	250	200

Duct dimensions mm	Material	Number of guide vanes	W mm	D mm
200x200	Glass wool	3	170	70
	Aluminium	L	135	100
		S	75	70
300x300	Glass wool	4	170	90
	Aluminium	L	135	100
		S	75	70
600x600	Glass wool	8	170	90
	Aluminium	L	135	125
		S	75	90

Type D-3 : The details of guide vanes

Type E : Round section divided-flow fittings

図一 供試体の種類 (次頁につづく)

Duct dimensions W×H(mm)							
Type	0	1	2	Type	0	1	2
F-1	200×200	200×200	200×200	F-6	600×600	300×300	300×300
	300×300	300×300	300×300		1000×300	700×300	300×300
	600×600	600×600	600×600	F-7	600×300	300×300	300×300
	300×1000	300×1000	300×1000		1000×300	700×300	300×300
F-2	600×600	450×450	450×450	F-8	600×300	300×300	300×300
F-3	600×600	250×250	450×450		1000×300	700×300	300×300
F-4	600×600	250×250	450×450	F-9	600×300	300×300	300×300
F-5	600×300	300×300	300×300		1000×300	700×300	300×300
	1000×300	700×300	300×300				

Type F : Rectangular section divided-flow fittings

図-1 供試体の種類

処理も上記と同様である。

また、各実験時におけるグラス・ファイバ・ダクトや鉄板ダクトの取り付け方法は、現場での施工方法と同様に行っている。

3. 実験装置および方法

3-1: 損失圧力

実験装置を図-2に示す。ダクト系に送風し、供試体上下流側鉄板ダクト側壁に設置した静圧管によりダクト軸方向静圧分布を4段階以上の流速について測定する。静圧は、ダクト断面で上下左右4点、ダクト軸方向に24点 (Type F-1~4は36点)、合計96点 (Type F-1~4は144点) で測定をする。直管部はグラス・ファイバ・ダクト入口および出口の全圧差から単位長さ (1m)

当たりの圧力差 (式 (1)) を求めて、これを損失圧力とする。また、損失圧力より供試体入口の平均流速の速度圧と等価直径とを考慮して摩擦抵抗係数 λ (式 (2)) を求め、4 流速以上の λ の平均をその直管部の摩擦抵抗係数 λ とする。

曲管部および分岐部はグラス・ファイバ・ダクト入口および出口における全圧差からグラス・ファイバ・ダクト直管部の損失圧力を考慮して上下流側ダクト中心軸交点での全圧差 (式 (3) および式 (4)) を求め、これを損失圧力とする。また、損失圧力を供試体入口の平均流速の速度圧で除して形状抵抗係数 ζ (式 (5)) を求め、4 流速以上の ζ の平均をその曲管部および分岐部の形状抵抗係数 ζ とする。

Straight glass fiber ducts

Elbows

Divided-flow fittings

図-2 実験装置 (気流特性)

供試体入口の平均流速は、各ダクトの上流にある流量測定用ダクトのピトー管により求める。

分岐部は、供試体上流側ダクトの流量 (Q_0) と分岐直通ダクトの流量 (Q_1) との比 Q_1/Q_0 を 1~0 の間で変化させた場合について実験を行う。また、この場合は直通あるいは分流側のいずれか一方の鉄板ダクト出口にダンパを取り付け、他方の出口においてピトー管により平均流速を測定し、流量を調整する。

$$Pr_{0-1} = \frac{Pt_0 - Pt_1}{l} \dots\dots\dots (1)$$

$$Pr = \lambda \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot V^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$Pr_{0-1} = \left(Pt_0 - \lambda_0 \cdot \frac{l_0}{D_0} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot V_0^2 \right) - \left(Pt_1 + \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{D_1} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot V_1^2 \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$Pr_{0-2} = \left(Pt_0 - \lambda_0 \cdot \frac{l_0}{D_0} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot V_0^2 \right) - \left(Pt_2 + \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{D_2} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot V_2^2 \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$Pr = \xi \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot V^2 \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$Pt = Ps + \frac{\gamma}{2g} \cdot V^2$$

Pr : 損失圧力 [kg/m²] (0: 上流側, 1: 下流側 (分岐部の場合直通側), 2: 分岐分流側)

Pt : 全圧 [kg/m²]

Ps : 静圧 [kg/m²]

l : 管長 [m]

D : 直径 [m] (D は、管が円形断面でない場合には次式による等価直径を用いる。 $D = 4 \times \text{断面積} / \text{周長}$)

V : 供試体入口あるいはダクト内の平均流速 [m/s]

γ : 空気比重 [kg/m³]

λ : 摩擦抵抗係数

ξ : 形状抵抗係数

3-2: 音響減衰

グラス・ファイバ・ダクトの音響的特質である音響減衰を求める方法は、まだ確立されていないため、ダクト内の音圧分布測定値の傾向から、実務的見地に立って音響減衰を求める方法を以下に述べる。

実験装置を図-3に示す。スピーカより 1/1 オクターブ・バンド・ノイズを発生し、供試体前後のダクト内中心軸方向音圧レベル分布を測定する。

出発点あるいは中心点からの距離を横軸に、測定結果の音圧レベルを縦軸にして表したものを図-4~6に示す。ダクト内中心軸に示す点が音圧レベルの測定点を示し、曲管部および分岐部の下流側はすべて音圧レベルを上流側中心軸の延長上にもってきて表している。

図-4の直管部の例によれば、出発点の最初の 1 m では多少乱れて急な減衰に、1.2~3 m では距離に比例して直線的に減衰しており、3 m 以降は少なだらかになっている。最初の 1 m では鉄板ダクト直後であるため、多少音響的な影響が見られ、3 m 以降では暗騒音に近づくためと考えられるので、グラス・ファイバ・ダクト直管部そのものの音響減衰量は、この場合、1.2~3 m 間の値から求めることが妥当と考えられる。1.2~3 m 間の音圧レベルによれば、前述のように、グラス・ファイバ・ダクト直管部の音響減衰は、ほぼ距離に対して直線的に減衰する。これは、他の直管部供試体のい

図-3 実験装置 (音響減衰)

図-4 直管部の音響減衰

れの周波数帯域においてもほぼ同様な傾向を示しており、このことから、その直線の傾きを求めて1m当たりの減衰量を直管部の音響減衰とする。

ただし、この音響減衰は、グラス・ファイバ・ダクトと鉄板ダクトとを接続する場合、設計上、単純に用いることはできない。グラス・ファイバ・ダクトと鉄板ダクトとを併用して用いる場合、図-4に示したように鉄板ダクト直後1mくらいまでとそれ以後とは音響特性に違いが見られる。そこで、上で示した音響減衰と同様に鉄板ダクト直後1mまでの減衰量もダクト設計上必要と考えるので上記の音響減衰とともに示すことにす

図-5 曲管部の音響減衰

図-6 分岐部の音響減衰

る。

図-5および図-6の曲管部および分岐部の例によれば上下流側ダクトいずれも直管部で求めた音響減衰量の直線の傾きにほぼ乗っている。これは、他の曲管部および分岐部供試体のいずれの周波数帯域においてもほぼ同様な傾向を示しており、このことから、上下流側それぞれの音圧レベルに直管部で求めた傾きの直線に乗るように引き、その直線を中心点まで延ばしてその交点の音圧レベルをそれぞれ求め、上下流側ダクト断面寸法が等しい場合はその音圧レベル差を、異なる場合はそれぞれのダクト断面積を考慮したパワーレベル差を求めて曲管部および分岐部の音響減衰とする。(式(6)および(7))ただし、一般的に、管内において平面進行波でなければ音圧レベルと音の強さのレベルとをほぼ等しいと考えることはできないが、あくまで実務的な見地から中高音域を含めてダクト内はすべて平面進行波と考えて計算している。

$$Lw_{0-1} = Lp_0 - Lp_1 + 10 \log_{10} \left(\frac{S_0}{S_1} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$Lw_{0-2} = Lp_0 - Lp_2 + 10 \log_{10} \left(\frac{S_0}{S_2} \right) \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

Lw : 音響減衰量 [dB] (0: 上流側, 1: 下流側 (分岐部の場合直通側), 2: 分岐分流側)

Lp : ダクト内音圧レベル [dB]

S : ダクトの断面積 [m^2]

3-3: ダクト側壁の遮音特性

遮音特性も音響減衰同様グラス・ファイバ・ダクトの音響的特質のひとつであるが、単に、グラス・ファイバ・ボード 25 mm 厚の透過損失を求めてもダクト設計上簡単には使用できない。そこで、実務的に、ダクト設計で鉄板ダクトとグラス・ファイバ・ダクトとを併用する場合の遮音特性を示す。

エネルギー的に考えれば(図-7)、グラス・ファイバ・ダクトに比して側壁の透過がほとんどない鉄板ダクトから W_1 の音響エネルギーを持つ音波がグラス・ファイバ・ダクトに入射するときに、鉄板ダクトとグラス・ファイバ・ダクト内との音響インピーダンスが異なるため W_1 のエネルギーの一部は W_R として反射し、また、一部はダクト自体に吸収されて残りのエネルギーが入射する。入射したエネルギーは、ダクト内を進行するが、

図-7 グラス・ファイバ・ダクト通過時のエネルギー

同時に、ダクト側壁を透過し (W_{01-4})、また、ダクト自体に吸収される。さらに、ダクト外にある音響エネルギーや、すでにダクト外に透過したエネルギー (W_{11-4}) がまたダクト内に入ってくる。この関係が繰り返されて鉄板ダクトから離れるに従ってダクト内音圧レベル (Lp) は減衰し、ある程度離れると減衰しなくなりダクト外に透過していく W_0 もあまり変化しなくなる。

今回は、ダクト設計資料として鉄板ダクトからガラス・ファイバ・ダクトに入射してくるエネルギー (W_1) とダクト側壁から放射されるエネルギー (W_{01-4}) との差をパワーレベル差で表し、それらをダクト内から外へ透過する場合の遮音特性とし、ダクト外から側壁へ入射してくるエネルギー (W_1) と、それらがダクト内へ入射してガラス・ファイバ・ダクト内を通過する音に影響をあたえるエネルギーとの差をパワーレベル差で表し、それらをダクト外から内へ入射する場合の遮音特性として2種類の実験を行った。

ダクト内から外へ透過する場合、ダクト内の音響減衰と同様に図-8(a) のダクト系を用いて行う。まず、3-2で求めたダクト内音圧レベル分布から鉄板ダクト出口のパワーレベル (Lw_1) を求める。次に、図-8(a) のダクト系からの透過音による残響室内平均音圧レベル (Lp_0) を測定し、透過音のパワーレベル (Lw_{R1}) を求める (式 (8))。さらに、図-8(b) のダクト系について同様に透過音のパワーレベル (Lw_{R2}) を求める。供試ダクト側壁からの透過パワーレベル (Lw_0) は、 Lw_{R1} から Lw_{R2} をエネルギー的に減じて求める (式 (9))。なお、図-8(a) および (b) におけるスピーカ音響出力の変化は測定値に影響のないことを確かめて

図-8 実験装置 (遮音特性)

ある。

供試ダクトの長さを0.9, 2.1, 4.5および6.9 mに変化させたときの Lw_1 と Lw_0 との差はいずれもほとんど変化しない (図-9 参照)。これは、供試体へ入射した音がほとんど入射直後のほぼ1 m以内でダクト側壁から透過するためと考えられる。したがって、ダクト側壁からの透過音は、鉄板ダクト出口から約1 mのダクト側壁の透過エネルギーが主なものと考え、ダクト内から外へ透過する場合の遮音特性は、鉄板ダクトからの入射音のパワーレベルとその鉄板ダクトと接続されてから1 m以内の側壁からの透過パワーレベルとの差として表すこととする (式 (10))。ただし、ここでの遮音特性は、前述したように、ガラス・ファイバ・ダクト側壁そのものの遮音量ではなく、ダクト系の設計において、鉄板ダクト内からガラス・ファイバ・ダクトに入射する軸方向進行音がどれだけダクト外部へ透過するか求めることを考えての遮音特性である。

$$Lw_{R1 \text{ or } R2} = Lp_{01 \text{ or } 02} + 10 \log_{10} \left(\frac{55.3}{C} \cdot \frac{V_0}{T_{1 \text{ or } 2}} \right) - 6 \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$Lw_0 = 10 \log_{10} (10^{Lw_{R1}/10} - 10^{Lw_{R2}/10}) \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{Difference of } Lw = Lw_1 - Lw_0 \quad \dots \dots \dots (10)$$

図-9 供試ダクトの長さによるダクト内から外へ透過する場合の遮音特性

図-10 供試ダクトの長さによるダクト外から内へ透過する場合の遮音特性

Lw_1 : 供試体入口のパワーレベル [dB]

Lw_0 : 供試ダクト側壁の透過パワーレベル [dB]

Lp_0 : 残響室内平均音圧レベル

Lw_{R1} : 図-8(a) で求めた透過パワーレベル [dB]

Lw_{R2} : 図-8(b) で求めた透過パワーレベル [dB]

C : 音速 [m/s]

V_0 : 室容積 [m^3]

T : 残響時間 [s]

ダクト外から内へ入射する場合は、図-8(c) および (d) に示すダクト系で行う。まず、残響室内に設置したスピーカより 1/1 オクターブ・バンド・ノイズを発生し、残響室内平均音圧レベル (Lp_0) を測定し、ダクト表面積を考慮した式 (11) よりダクト側壁へ入射するパワーレベル (Lw_1) を求める。式 (11) では、実際に、ダクトが設置される場所は、拡散音場とは言いがたい所が多いため、あえてダクト外側の室内音圧レベル Lp_0 にダクト表面を考慮したものを入射パワーレベルとした。

つぎに、供試ダクト内中心軸方向音圧レベルを 20 ポイント以上測定する。いずれのポイントも音圧レベルにほとんど差はないので、それらを平均してダクト内平均音圧レベル (Lp_D) とし、式 (12) より Lw_D を求め、ダクト内進行方向のパワーレベルとする。ここでの Lp_D は、単なるダクト内の音圧レベルであって進行方向の音圧レベルとは言いがたいが、今回の実験では進行

表-1 直管部の摩擦抵抗係数 $\bar{\lambda}$

Type A (mm ϕ) or Type B (mm)	Friction coefficient $\bar{\lambda}$
100	0.0320
200	0.0377
300	0.0307
200 $\times$ 200	0.023
200 $\times$ 400	0.020
300 $\times$ 300	0.021
300 $\times$ 600	0.022
300 $\times$ 1000	0.022
600 $\times$ 600	0.022
600 $\times$ 1000	0.019
1000 $\times$ 1000	0.019

表-2 円形断面曲管部の
形状抵抗係数 $\bar{\xi}$

Type	Duct Diameters d(mm ϕ)		
	100	200	300
C-1	1.23	1.11	1.27
C-2	0.437	0.506	0.394
C-3	0.231	0.328	0.321
C-4	0.476	0.287	0.337
C-5	0.265	0.142	0.171

表-3 正方形および長方形断面曲管部の形状抵抗係数 $\bar{\xi}$

Type		Duct Dimensions (mm)			
		200x200	300x300	300x1000	600x600
D-1		1.4	1.4	1.4	1.2
D-2		0.81	0.75	0.92	0.95
D-3	Glass Wool Turning Vanes	0.59	0.39	—	0.38
	Aluminium Turning Vanes L	0.65	0.61	—	0.45
	Aluminium Turning Vanes S	0.72	0.63	—	0.67
D-4		0.60	0.49	0.90	0.67
D-5		—	0.38	—	0.33

波成分を取り出すのが不可能であったため、 Lp_D をダクト軸進行方向の音圧レベルとし、また、3-2 同様ダクト内は、すべて平面進行波と仮定した。

図-10 に示す供試ダクトの長さ 3.3 と 6.9 m の Lp_0 と Lp_D との音圧レベル差はほぼ一定で、パワーレベル差は供試ダクトの長さが 3.3 から 6.9 m に約倍になったぶんだけ後者の方がほぼ 3 dB 全体的に大きい。そこで、ダクト外から内への遮音特性は、単位長さ (1 m) 当たりのダクト側壁への入射パワーレベル (Lw_1) とダクト内パワーレベル (Lw_D) との差として表すことにする (式 13)。ただし、ここでの遮音特性は、グラス・ファイバ・ダクト側壁そのものの遮音量ではなく、ダクト内の軸方向に進行する音に対しての外部からの音の影響を考慮しての遮音特性である。

$$Lw_1 = Lp_0 + 10 \log_{10} A \quad \cdots (11)$$

$$Lw_D = Lp_D + 10 \log_{10} S \quad \cdots (12)$$

$$\text{Difference of } Lw = Lw_1 - Lw_D \quad \cdots (13)$$

Lp_0 : 残響室内平均音圧レベル [dB]

A : ダクト表面積 [m^2]

Lp_D : ダクト内平均音圧レベル [dB]

S : ダクト断面積 [m^2]

4. 実験結果および考察

4-1: 損失圧力

直管部の摩擦抵抗係数 $\bar{\lambda}$ を整理した結果を表-1 に示す。 $\bar{\lambda}$ は実験範囲内のレイノルズ数 ($0.3 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$) に対してはほぼ一定値を示す。円形断面ダクトは、200 ϕ が 0.0377 以外は、ほぼ 0.031 前後、また、長方形断面ダクトは 0.021 前後を示し前者の方が後者に比べて大きい。

曲管部の形状抵抗係数 $\bar{\xi}$ を表-2 および表-3 に示す。円形断面ダクトでは、2 ピースから 4 ピースにいくに従って、また、角度が小さくなるに従って $\bar{\xi}$ は小さくなる。

図-11 Type E の形状抵抗係数 $\bar{\xi}$

長方形断面ダクトも、ピース数が大きく、角度が小さくなるほど ξ は小さくなり、 $90^\circ \cdot 2$ ピースでは、Type D-2はD-1のそれより小さい。

また、ガイドベーン付きでは、それを付けない場合よりも ξ は $2/3$ 以下になる。ガイドベーンがグラスウール製とアルミニウム製のものとを比較すると前者の方が ξ は小さい。また、同じアルミニウム製でもベーンの数少なく長さが長い L の方が ξ が小さい。

分岐部の形状抵抗係数 ξ を図—11～13に整理してそれぞれ示す。円形断面ダクト Type E は分岐分流抵抗係数（区別するために分流側を分岐分流抵抗係数，直通側を分岐直通抵抗係数とする）がほぼ $1.0 \sim 2.0$ 前後で，分岐直通抵抗係数はそれより小さく 0.0 前後 ~ 1.5 以下となり，直通側断面が 150ϕ と他より小さい Type E-2 200ϕ では流量比 Q_1/Q_0 が 0.8 および 1.0 のときに分岐分流および分岐直通抵抗係数いずれにおいても他より大きい。正方形および長方形断面ダクト Type F-1～3 は分岐分流抵抗係数は 1.0 前後 ~ 2.0 以下で，分岐直通抵抗係数は，Type F-3 以外 0.0 前後となっている。

図—12 Type F-1～4 の形状抵抗係数 ξ

Type F-3 は，直通側が，上流側や分流側に比してダクト断面が小さいため，すべてそれらは 0.0 以下となり流量比 Q_1/Q_0 が 1.0 では -6.1 となっている。

また，分岐部にガイドベーンを有する Type F-4 では，流量比 Q_1/Q_0 が大きくなれば，分岐分流抵抗係数はほぼ $3.1 \sim 0.0$ の間で次第に小さくなり，分岐直通抵抗係数は，流量比 Q_1/Q_0 が 0.4 のときに，最小値を示し，それより大きくあるいは小さいと分岐直通抵抗係数は大

図—13 Type F-5～9 の形状抵抗係数 ξ

きくなり、流量比 Q_1/Q_0 が 1.0 で 3.6 となっている。

Type F-5 および F-9 の抵抗係数は、600×300 および 1000×300 いずれも一部を除きほぼ同様な傾向を示している。分岐直通抵抗係数は、Type F-5～9 いずれも 0.0 前後で ± 1.0 以内におさまっている。分岐分流抵抗係数は、Type F-5 は流量比 Q_1/Q_0 が大きくなると 2.5～1.0 前後の間で次第に小さくなり、分岐分流側の入口が特殊な Type F-6～8 は、Type F-5 と比べて分岐分流抵抗係数は小さくなり、流量比 Q_1/Q_0 が大きくなると 0.0～1.0 の間で次第に大きくなる。Type F-9 では、流量比 Q_1/Q_0 が小さくなるほど分岐分流抵抗係数は大きくなり、流量比 Q_1/Q_0 が、0.0 で 600×300 が 9.1、1000×300 が 14 を示す。

4-2：音響減衰

直管部の単位長さ（1 m）当たりの音響減衰を図一14～16 に示す。図一14 からグラスヤーンの有無は音響減衰にはほとんど影響しない。

全体的にみて、円形断面の直径あるいは正方形断面の一边が 200 mm のもの以外は、1 kHz 帯域に減衰量の最大値がある。円形、正方形および長方形断面いずれも有効直径が大きくなるに従って減衰量は小さくなり、有効直径最大のダクト断面 1000×1000 では、全周波数帯域ほぼ一様な減衰量で、3.5 dB 以下となる。円形断面の直径あるいは正方形断面の一边が 200 mm のものは、2

図一14 円形断面直管部の音響減衰

図一15 正方形断面直管部の音響減衰

図一16 長方形断面直管部の音響減衰

kHz 帯域に最大値があり、特に、ダクト断面 200×200 では、30 dB/m 近くまで達し、いずれも他の供試体に比べて全体的に高い値を示している。

また、鉄板ダクト直後 1 m までのグラス・ファイバ・ダクトの音響減衰を図一17～19 に示す。

上記のグラス・ファイバ・ダクトそのものの音響減衰量より全体的に大きい、傾向としては、上記と同様、円形、正方形および長方形断面いずれも有効直径が大きくなるに従って減衰量は小さくなる。また、円形断面の直径あるいは正方形断面の一边が 200 mm のものは、2 kHz 帯域に最大値があり、いずれも他の供試体に比べて全体的に高い値を示している。

鉄板ダクトの後にグラス・ファイバ・ダクト長さ L

図一17 円形断面直管部の鉄板ダクト境界部から 1 m の音響減衰

図一18 正方形断面直管部の鉄板ダクト境界部から 1 m の音響減衰

図一19 長方形断面直管部の鉄板ダクト境界部から 1 m の音響減衰

mを接続する場合のダクト内音響減衰量は、図—17～19のデータに図—14～16のデータを $(L-1)$ 倍した値を加えることにより求めることができる。ただし、ダクト断面 300×1000 の2k、4kおよび8kHz帯域、 600×1000 および 1000×1000 の500Hz帯域においては、ダクトの長さ L が2m以上に限り、上記の方法で音響減衰量を求めることができる。

曲管部の音響減衰を図—20～26に示す。図—20～22を見ると円形断面曲管部100φ、200φおよび300φのいずれにおいても2ピースは、曲がり角度 90° が全周波数帯域において減衰量が大きく 45° 、 30° の順に小さくなる。また、曲がり角度 90° では、100φ、200φおよび300φは、いずれにおいても、2ピースが他に比して大きく、3ピースおよび4ピースは、ほぼ同様な傾向を示

している。

図—23～25によれば、正方形断面曲管部 200×200 で

図—23 正方形断面曲管部の音響減衰

図—24 正方形断面曲管部の音響減衰

図—25 正方形断面曲管部の音響減衰

図—20 円形断面曲管部の音響減衰

図—21 円形断面曲管部の音響減衰

図—22 円形断面曲管部の音響減衰

図—26 長方形断面曲管部の音響減衰

図-27 正方形および長方形断面分岐部の音響減衰

図-28 正方形および長方形断面分岐部の音響減衰

図-29 正方形および長方形断面分岐部の音響減衰

図-30 正方形および長方形断面分岐部の音響減衰

は 500 Hz および 2 kHz 帯域で Type D-1 の方が、300×300 と 600×600 では高音域で Type D-2 の方が減衰量は多少大きくなるが、全体的にみて、ほぼ同様な傾向を示している。それに比較して曲がり角度 90°・3 ピースになると 2 ピースに比べて 1 kHz 帯域以上の周波数帯域では減衰量に大きな差が生じる。

ガイドベーン付きでは、1 kHz 帯域以下は、3 者いずれもほぼ同じような傾向を示すが、2～8 kHz 帯域になるといずれもグラスウール製ガイドベーンが一番大きい。また、200×200 および 300×300 では、アルミニウム製ガイドベーンの数が多い方が減衰量は大きく、600×600 では、数による差はあまりみられない。

図-26 によれば、長方形断面曲管部 1000×300 は、Type D-1, 2 および 4 とともに 1 kHz 帯域以下では同様な周波数特性を示しており、2 kHz 帯域以上では、D-2, 1, 4 の順に大きく D-2 と D-1 では 5 dB 前後、D-1 と D-4 で 11～12 dB 前後の差がある。

分岐部の音響減衰を図-27～30 に示す。

上流側ダクト、下流側直通および分流ダクトの断面寸法が等しい正方形および長方形断面分岐部 (Type F-1) は、直通側ではすべて 5 dB 以下である。また、分流側では、200×200 が 500 Hz 帯域以下では 6 dB 以下、1 および 2 kHz 帯域で 12 dB、4 および 8 kHz 帯域で 33 および 46.5 dB となり、4 kHz 帯域から急激に減衰量が大きくなる。300×300 は、1 kHz 帯域以下では、6 dB 以下、2～8 kHz 帯域にいくに従って比例的に上昇していく。また、600×600 では、63, 125 および 1 kHz 帯域が 5 dB 以下、250 および 500 Hz 帯域が 6 および 7.5 dB となり、2 kHz 帯域で 38 dB と急激に上昇して、2～8 kHz 帯域では、ほぼ 39 dB 前後のフラットな値を示す。また、長方形断面分岐部 300×1000 では、250 Hz 帯域以下では 5 dB 以下、500 および 1 kHz 帯域で 8.5 dB、そして 1 kHz 帯域から上記の 300×300 と同様に比例的に上昇していく。上流側ダクト断面が 600×600 で分岐管断面がそれより小さい分岐部をまとめた図-28 によれば、分流ダクト断面 450×450 で、直通ダクト断面が 450×450 (Type F-2) と 250×250 (Type F-3) の分流側では、1 kHz 帯域以下は、ほぼ同様な周波数特性を示しており、2 および 4 kHz 帯域に 10 dB 以上の差が表るが、図-27 の 600×600 と同様に 2～8 kHz 帯域はフラットになる傾向がある。また、直通側では、全周波数帯域において後者の方が大きい。

ベーンがあるものは、分流側が 7 dB 前後のフラットな周波数特性となり、直通側は、500, 1 k および 2 kHz 帯域がベーンなしより 7～10 dB 大きくなる。

また、分岐分流ダクトの入口の差異による特性を示した図-29 および 30 によれば、600×300 では Type F-8 と 9 以外はほとんど同様な特性を示す。Type F-8 およ

び9では、直通側が他の3者に比べて全体的に大きめである。また、分流側では、F-8は、1 kHz帯域まではほぼ13 dB前後のフラットな特性となり、1 kHz帯域以上では、前の3者と同様な特性を示す。また、F-9のガイドベーン付きでは、1 kHz帯域以下では、F-5～7と同様な特性を示すが、2～8 kHz帯域では4, 8, 10 dBと他と比べて30 dB以上小さい。

また、それよりも断面が大きい1000×300では、600×300とほぼ同様な傾向を示すがより詳細に検討すれば、Type F-5～8の直通側は、250と2 kHz帯域に7 dB前後の山を持つほぼ類似の特性を示し、ガイドベーン付きは、1 kHz帯域に7 dBのピークを持つただらかな特性になる。また、分流側では、F-9以外は、いずれも同様な傾向を示すが、600×300と異なり2 kHz帯域以上に7～10 dBの差がみられる。また、ガイドベーン付きは、2 kHz帯域以上で他に比較して30 dB前後の差がある。

4-3: 側壁の遮音特性

直管部のダクト内から外へ透過する場合の単位長さ(1 m)当たりの供試体入口のパワーレベルとダクト側

図—31 ダクト内から外へ透過する場合の遮音特性

図—32 ダクト内から外へ透過する場合の遮音特性

図—33 ダクト内から外へ透過する場合の遮音特性

壁からの透過パワーレベルとの差を図—31～33に示す。円形断面ダクトでは、1 kHz帯域付近まで周波数が高くなるにつれてパワーレベル差が減少する。グラス・ヤーンの有無による差は少ない。正方形および長方形断面ダクトでは、1 kHz帯域以上でパワーレベル差がダクト断面によらずほぼ等しく、周波数が高くなるにつれて増大する。

直管部のダクト外から内へ透過する場合の単位長さ(1 m)当たりの供試ダクト側壁への入射パワーレベルとダクト内パワーレベルとの差を図—34～36に示す。円形断面ダクトのパワーレベル差は、ほぼ様な周波数特性を示し、全体的にみてグラス・ヤーンが有るときよりも無い方が遮音性能が良い。正方形および長方形断面ダクトでは、一部を除き周波数が高くなるにつれてパワーレベル差も増大する。

遮音性能は、円形断面ダクトの方が正方形および長方形断面ダクトよりダクト内から外およびダクト外から内

図—34 ダクト外から内へ透過する場合の遮音特性

図—35 ダクト外から内へ透過する場合の遮音特性

図—36 ダクト外から内へ透過する場合の遮音特性

へ透過する場合いずれにおいても良い性能を示す。

5. 結 論

今回実験を行った供試体の特徴を以下にまとめる。

5-1: 直管部

a) 円形断面ダクトの摩擦抵抗係数 $\bar{\lambda}$ が正方形および長方形断面ダクトのそれより大きい。円形断面 200 ϕ のダクトは、他の円形断面ダクトと比べて 1.2 倍前後大きい。

b) 鉄板ダクトとガラス・ファイバ・ダクトとを併用して用いる場合、鉄板ダクト直後 1 m とそれ以降とでは減衰量が異なる。

c) 音響減衰は、円形断面 200 ϕ および正方形断面 200×200 のものが他と比べて 2 kHz 帯域に異常に大きな減衰量をもち、その他は、1 kHz 帯域に減衰量の最大値があり、いずれも有効直径が大きくなるに従ってそれらは小さくなる。

d) 遮音性能は、円形断面ダクトの方が正方形および長方形断面ダクトよりダクト内から外およびダクト外から内へ透過する場合いずれにおいても良い性能を示す。また、ガラス・ヤーンの有無は、音響減衰およびダクト内から外へ透過する場合の遮音性能にはあまり差はなく、ダクト外から内へ透過する場合の遮音性能で有るときより無い方が良い性能を示す。

5-2: 曲管部

a) 形状抵抗係数 $\bar{\xi}$ は、2 ピースから 4 ピースに、また、角度が小さくなるに従って小さくなる。

b) 音響減衰は、角度が小さくなると減衰量も小さくなり、円形断面ダクトでは、2 ピースがもっとも大きく、3 ピースと 4 ピースは同様な傾向を示しており、正方形および長方形断面ダクトにおいても、2 ピースより 3 ピースの方がそれは小さい。

c) ガイドベーン付きは、付けないものよりも形状抵抗係数 $\bar{\xi}$ は 2/3 以下となり、1 kHz 帯域以下では音響減衰量は両者ともあまり差はなく、それよりも高い周波数帯域で大きな差が生じ前者は後者のほぼ 1/2 になる。グラスウール製ガイドベーンがアルミニウム製のそれより $\bar{\xi}$ は小さく音響減衰量は大きい。また、ベーンの数が少なく長さが長い方が全体的にそれらは小さい。

5-3: 分岐部

a) 分岐直通側と分流側とでは、いずれの流量比においても全体的に後者の方が形状抵抗係数 $\bar{\xi}$ は大きい。

b) 分岐直通側では断面寸法や流量によって 0 以下になるものがある。

c) ガイドベーン付きでは、ガイドベーンなしに比し、流量比により抵抗係数が大きく変化する。

d) 音響減衰は、直通側ではすべて 10 dB 以下であり、分流側も 500 Hz 帯域以下では直通側とほぼ同様な傾向を示しており、1 kHz 帯域以上で急激に減衰量が大きくなる。ガイドベーン付きでは、分流側の 1 kHz 帯域以上がほとんど直通側と近い値になり、逆にそれより小さくなるものもある。また、分流側のダクト入口の違いによる大きな差は見られない。

謝 辞

本研究にあたり当時 k. k. 東京興業貿易商会およびマイクロ・ダクト・システム k. k. の加藤孝義氏、日本板硝子 k. k. の寺嶋健二氏に多大のご協力をいただいた。また、本実験において、当時日大助手であった飯島和俊氏（現日本ノイズ・コントロール k. k. ）、日本大学の大学院生、卒論生の諸君の労を多とした。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) 勝田高司, 後藤 滋, 寺沢達二: ファイバー・ダクトの遮音性能に関する実験; 生産研究, Vol. 11, No. 4, pp. 27~28, 1959. 8
- 2) 長友宗重ほか: グラスウールダクトの減音特性について; 日本建築学会論文報告集, 号外, pp. 564, 1967
- 3) 板本守正ほか 1 名: グラス・ウール・ダクト系の損失圧力について; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 371~372, 1977. 10
- 4) 板本守正ほか 4 名: セル型消音器の音響特性について; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 183~184, 1978. 9
- 5) 板本守正ほか 4 名: グラス・ファイバ・ダクトの音響特性について; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 185~186, 1978. 9
- 6) 板本守正ほか 2 名: グラス・ファイバ・ダクト系の曲管部、分岐部および吹出し口ユニットの音響特性について; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 105~106, 1980. 9
- 7) 板本守正ほか 1 名: グラス・ファイバ・ダクト系の損失圧力について; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 485~486, 1984. 10
- 8) 板本守正: グラス・ファイバ・ダクトの音響特性について; 空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, pp. 29~32, 1978. 4
- 9) 板本守正: グラス・ファイバ・ダクト系の性能について; 空気調和・衛生工学会学術論文集, pp. 193~196, 1985. 10

SYNOPSIS

UDC : 534.831 : 628.517 : 696/697

ON AIR FLOW AND SOUND CHARACTERISTICS OF STRAIGHT DUCTS, ELBOWS AND DIVIDED-FLOW FITTINGS OF GLASS FIBER DUCT SYSTEMS.

by Dr. MORIMASA ITAMOTO, Professor of Nihon Univ.
and HIROYOSHI SHIOKAWA, Assistant of Nihon Univ.,
Member of A. I. J.

For evaluating the air flow and sound characteristics of straight ducts, elbows and divided-flow fittings of glass fiber duct systems, the variations of ducts are studied.

Experimental methods to evaluate air flow and sound characteristics of glass fiber duct systems are described. Pressure loss, sound attenuation and sound insulation characteristics of duct wall are discussed.