

ベント（ポート・ダクト）の設計

○ ヘルムホルツ共鳴器の式

ベンテッド（バスレフ）方式の設計で容積（Vb）とチューニング周波数（Fb）が導き出されたら次に最適なベント（ポート・ダクト）の寸法を計算します。

基本式は、ヘルムホルツ共鳴器の式（1式）で、この式を様々に変形して必要なベント関連の数値を算出します。本冊子では、簡略のためヘルムホルツの式と呼びます。

※ヘルムホルツの式は、ある容積の箱や壺などにベントや吹き口が付いた形状の物の共振周波数を求める式です。

※ヘルムホルツの式の基本形は、二階運動微分方程式でそこから1式が導き出されます。

※ここでベントとは、ポート又ダクトの総称で、ポートは厚みのある板などに穴を開けたもの、ダクトはパイプ等長さのある物を指します。

※ヘルムホルツ共鳴器の構造を持つ物は、何等かの周波数で必ず共振する物理現象です。

$$Fb = \frac{c}{2 \times \pi} \sqrt{\frac{Sv}{L' \times Vb}} \quad \cdots 1 \text{ 式}$$

Fb：ヘルムホルツ共鳴周波数（Hz）
 c：音速（345m/s @22.5℃）
 Sv：ベントの面積（m²）
 L'：ベントの実効長・厚み（m）
 Vb：ボックス内容積（m³）

○ ベントの開口端補正

1式を使用して計算を行う上で留意しなければならない事は、式中のL（ベントの物理長）に開口端補正を行う必要性です。

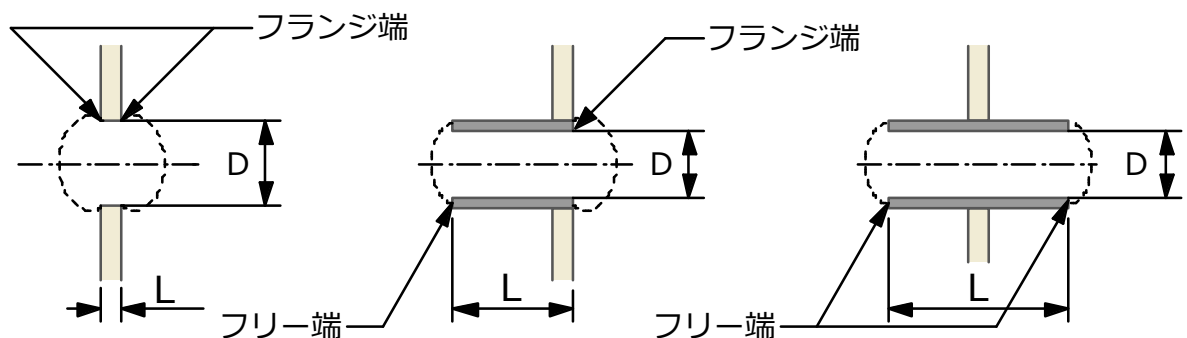


図1 両端フランジベント 図2 フランジ端+フリー端ベント 図3 両端フリーベント

図1～3に想定されるベントの断面形状を示します。点線で示すようにベントの開口側に空気が付加され実効長が物理長Lより長くなります。フランジ端とフリー端では、フランジ端の方が付加長が長くなり、L''：空気付加長、L'：実効長、直径Dの円形ベントとし面積Svとすると

フランジ端片側の補正值長 $L'' = 0.425 \times D = 0.475 \sqrt{Sv}$

フリー端 片側の補正值長 $L'' = 0.307 \times D = 0.346 \sqrt{Sv}$

$$\begin{aligned} \text{図1の両端合計補正值長 } L'' &= 2 \times 0.425 \times D = 0.850 \times D = 0.958\sqrt{Sv} \\ \text{図2の両端合計補正值長 } L'' &= (0.307+0.425) \times D = 0.732 \times D = 0.826\sqrt{Sv} \\ \text{図3の両端合計補正值長 } L'' &= 2 \times 0.307 \times D = 0.614 \times D = 0.693\sqrt{Sv} \end{aligned}$$

となります。参照をDとするか $\sqrt{Sv}$ とするかは、ケースにより使い分けます。
実際に数値を代入してみると、

$$\begin{aligned} \text{図1で } D &= 50\text{mm}, L = 20\text{mm} \text{ なら実効長 } L' = 20 + 0.850 \times 50 = 62.5 \text{ mm} \\ \text{図2で } D &= 50\text{mm}, L = 100\text{mm} \text{ なら実効長 } L' = 100 + 0.732 \times 50 = 136.6 \text{ mm} \\ \text{図3で } D &= 50\text{mm}, L = 100\text{mm} \text{ なら実効長 } L' = 100 + 0.614 \times 50 = 130.7 \text{ mm} \end{aligned}$$

以上の様な結果になり無視出来ない値なのが判ります。

図2のダクトについて 10 Liter の容積 (Vb) の場合の共振周波数を計算してみると

$$\begin{aligned} Fb &= \frac{c}{2 \times \pi} \sqrt{\frac{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2}{L' \times Vb}} && \text{単位をMK Sに揃え} \dots\dots 2 \text{ 式} \\ &= \frac{345}{2 \times \pi} \sqrt{\frac{\pi \times \left(\frac{0.05}{2}\right)^2}{\frac{136.6}{1000} \times \frac{10}{1000}}} && = 65.83 \text{ Hz} \\ &&& \text{開口端補正なしでは、76.94 Hz} \end{aligned}$$

以上の結果を得ました。

注意点としてこのダクトの場合、ダクト体積 = $\pi \times (50/2)^2 \times 100\text{mm} = 0.196 \text{ Liter}$ の容積があるので現実時は、10 Liter に減算しておいた方が精神衛生上良いかも知れませんが、この場合はダクト体積が2%なのでほぼ無視出来ますが5%以上になると特性に影響が生じます。

○ 式の変形その1

1式にて共振周波数は求まりますが、例えば共振周波数とベントの直径からベント長さが求められれば便利なので変形します。**Nv**：ベントの数とし1式の両辺を2乗して、

$$Fb^2 = \left(\frac{c}{2 \times \pi}\right)^2 \times \frac{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times Nv}{(L + L'') \times Vb} = \frac{c^2}{16 \times \pi} \times \frac{D^2 \times Nv}{(L + L'') \times Vb}$$

$$L + L'' = \frac{c^2}{16 \times \pi} \times \frac{D^2 \times N_v}{Fb^2 \times Vb} \quad L = \frac{c^2}{16 \times \pi} \times \frac{D^2 \times N_v}{Fb^2 \times Vb} - L''$$

D : mm、Fb : Hz、Vb : Liter で入力し、L : mm で出力するには、

$$L = 2368 \times \frac{D^2 \times N_v}{Fb^2 \times Vb} - L'' \quad \dots\dots\dots 3 \text{ 式}$$

試しに上で求めた Fb を逆算してみると、

$$L = 2368 \times \frac{50^2 \times 1}{65.83^2 \times 10} - 0.732 \times 50 = 100 \text{ mm}$$

最初のダクトの物理長 100mm が求められました。

また、複数ダクトの場合でも補正は、1 個分にするのがポイントです。

○ 式の変形その 2

ボックス容積 (Vb) が比較的大きい場合、共振周波数 (Fb) が高い場合、例えばダブルバスレフの内部ベントなどバッフルに穴を開けただけで済む場合にバッフルの板厚から開口面積または開口径を求められるように 1 式を変形します。1 式を分かり易く再記すると

$$Fb = \frac{c}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2}{(L + L'') \times Vb}} \quad \dots\dots\dots 4 \text{ 式}$$

この式の $L + L'' = L'$ から D を求める変形をします。

入力は、Fb : Hz、Vb : Liter、L : mm の 3 つになり図 1 両端フランジベントになります。両辺を 2 乗し変形して、(Nv : ベントの数)

$$Fb^2 = \left(\frac{c}{2 \cdot \pi}\right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot N_v}{(L + L'') \cdot Vb}$$

$$\frac{c^2 \cdot N_v}{16 \cdot \pi \cdot Fb^2 \cdot Vb} \cdot D^2 - 0.85 \cdot D - L = 0$$

この式は、D についての 2 次式なので 2 次式の根の式を用いて

$$\frac{c^2 \cdot N_v}{16 \cdot \pi \cdot Fb^2 \cdot Vb} = K \quad \text{と置き}$$

$$D = \frac{0.85 + \sqrt{0.85^2 + 4 \cdot K \cdot L}}{2 \cdot K} \quad \dots\dots\dots 5 \text{ 式}$$

K について Fb : Hz、Vb : Liter、L : mm で与え D を mm で得るとすると、

$$K = \frac{(345 \cdot 1000)^2 \cdot N_v}{16 \cdot \pi \cdot Fb^2 \cdot Vb \cdot 100^3} = \frac{2368 \cdot N_v}{Fb^2 \cdot Vb}$$

計算例 ; Fb : 100 Hz、Vb : 10 Liter、L : 20 mm とすると

$$K = \frac{2368 \cdot 1}{100^2 \cdot 10} = 0.02368$$

$$D = \frac{0.85 + \sqrt{0.85^2 + 4 \cdot 0.02368 \cdot 20}}{2 \cdot 0.02368} = 52.1 \text{ mm}$$

よって、20 mm 厚のバツフルに $\phi 52.1$ の穴を開ければ良い、この時の面積 Sv は、

$$S_v = \pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \cdot 26.05^2 = 2132 \text{ mm}^2 = 21.32 \text{ cm}^2$$

上記は、ベント直径 D について求めましたが、Sv (面積) についても同様の条件で求めるとこの場合の K は、(Nv : ベントの数)

$$K = \frac{(345 \cdot 1000)^2 \cdot N_v}{(2 \cdot \pi)^2 \cdot Fb^2 \cdot Vb \cdot 100^3} = \frac{3015 \cdot N_v}{Fb^2 \cdot Vb} = \frac{3015 \cdot 1}{100^2 \cdot 10} = 0.03015$$

$$\sqrt{S_v} = \frac{0.958 + \sqrt{0.958^2 + 4 \cdot 0.03015 \cdot 20}}{2 \cdot 0.03015} = 46.15 \quad \dots\dots\dots 6 \text{ 式}$$

$$S_v = \sqrt{S_v^2} = 46.15^2 = 2130 \text{ mm}^2 = 21.3 \text{ cm}^2$$

上で得られた値とほぼ同じ結果が得られました。

上記、1～6式の計算例に従い、図1～3のベント形状の補正値を当てはめれば、全てのベント形状の場合についてベント寸法が求められる事になります。

再記すると

両端フランジの場合 Dを求めるなら $0.85 \cdot D$ を S_v を求めるなら $0.958 \sqrt{S_v}$ を

フランジ端+フリー端で Dを求めるなら $0.732 \cdot D$ を S_v なら $0.826 \sqrt{S_v}$ を

両端フリーで D なら $0.614 \cdot D$ を S_v なら $0.693 \sqrt{S_v}$ これらと L をそれぞれの位置へ代入すれば良い事になります。

○ 角形ベント（正方形・長方形）の考え方

これまでは、円形のベントについて計算式を求めましたが、角形ベントの場合を考えてみます。断面形状は、図1～3と同じで開口形状が角形になったと考えます。

◎ 角形ベントでは、角の四隅で気流が阻害されベントの有効面積が少なくなる

角ダクト、オーバルダクトの相当直径

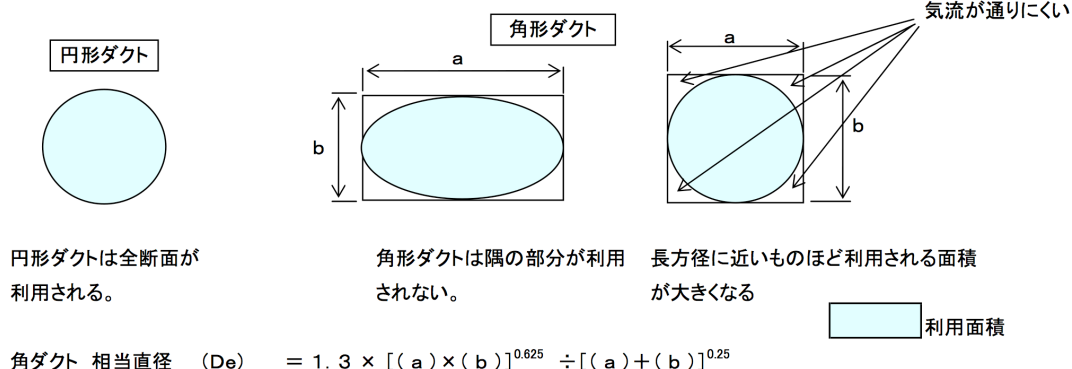
改訂 やさしい局排設計教室(中央労働防災災害防止協会より)

角ダクトの場合には、ダクトの縦と横の寸法を掛けたものが断面積だと考えがちですが、実はそう、簡単にはいきません。

円形ダクトの場合には気流はダクト断面の全体をほぼ同じ速度で通りますが、角形ダクトの場合には断面の四隅の部分は気流が通りにく、言い換えれば、円形ダクトの場合には、ダクト断面積全部気流の通路として利用されますが、角形ダクトの場合には、隅のところに気流の通路として利用されない部分が出来てしまい、実際に利用される断面積は縦と横の寸法を掛けた値より、小さいのです。

その為に角形ダクトの中を通る気流の速度は見掛けより大きく(隅の部分では小さく)なります。

この違いは縦と横の差が大きくなればなるほど(ダクトの断面が扁平になるほど)大きくなります。



資料1 角形ベントの有効面積

資料1は、角形ベントの有効面積と相当な直径D eを求める式です。この式は、本来水道管や排気ダクトなどに適応されるようですが、有用性が高いと判断して使用させて貰う事にします。

a・b を各辺長とすると相当直径D eは、

$$De = 1.3 \times \frac{(a \times b)^{0.625}}{(a + b)^{0.25}} \quad \dots\dots\dots 7 \text{ 式}$$

因みに、10cmx10cm (100cm²) のベントのD e=10.93cm 面積率=93.86%

5cmx20cm (100cm²) のベントのD e=10.34cm 面積率=83.95%

2cmx50cm (100cm²) のベントのD e= 8.61cm 面積率=58.21%

◎ 正方形の場合

上記のD e また面積率を採用します。開口端補正も同様に考えます。

◎ 長方形の場合

長方形の場合問題になるのは、開口端補正をどうするか、単純に $S_v = \text{長辺} \times \text{短辺}$ の面積で補正すると補正值 (L") は、大きく成りすぎるのは明らかですし7式のD e、面積を採用してもおかしい結果になります。本来開口端補正は、円形ベントに適応される値です。この辺の事に言及したサイトを見つけられませんでしたので、ここからは筆者の考え方で完全に検証した訳ではないのを断っておきます。

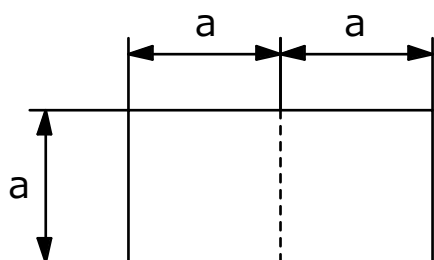


図4 長方形ベント例 長辺 = 短辺 x 2

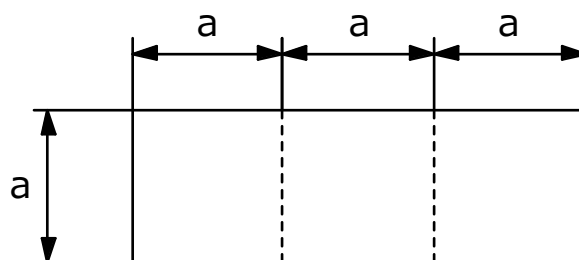


図5 長方形ベント例 長辺 = 短辺 x 3

図4・5 の様な長辺が短辺の2倍3倍のベントを考え、補正值の面積 (Sv) を考えると $S_v = a \times a$ が妥当だろうと思われます。結論、長方形のベントは、長辺が長くても補正值は短辺の2乗の面積で補正すれば良い事になります。

もう少し突っ込めば7式の面積を均等分したものになるとも考えられますが、それは、今後の課題として置きます。

○ ベントを分割する場合

ベントを複数に分割したい時があります。一般的に合計の面積が同じであれば複数に分割して良いと言われています。これは、余り間違いではありませんが開口端補正を厳密に考えると分割された個々のベントの面積は小さくなるので補正值も少なくなりベントの物理長も幾分長くする必要があります。(そこまでしなくても良いとも言えますが、多数に分割した場合には、無視出来なくなります。) よって分割された面積よりの補正長から物理長も補正して行くのがベストだと言えます。

○ 寸法の違う複数のベントを取り付けた場合

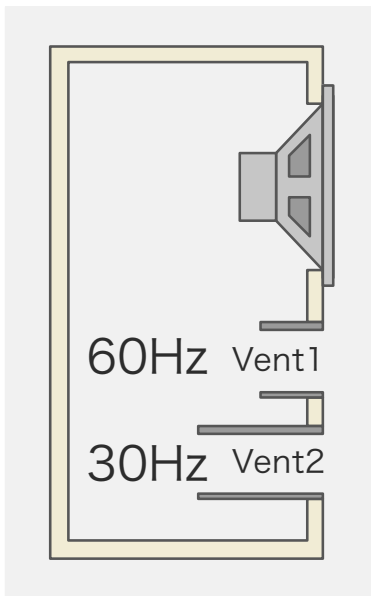


図6 複数ベントの例

図6の様に寸法の違う2個のベントを取り付けた場合、最終的な共振周波数は、どうなるでしょうか。

結論から言うと、ベント1で単独に60Hzに共振しベント2で単独に30Hzに共振する時、合成された共振周波数は以下になります。

$$Fbx = \sqrt{60^2 + 30^2} = 67Hz$$

一見、平均値 = 45Hz になるように考えがちですが実際には、自乗和平方根になり高い方の周波数 (60Hz) より高くなります。2個のベントからは同じ 67Hz の出力が得られ短いベントの方から大きな出力が出ます。

3個の場合は、

$$Fbx = \sqrt{40^2 + 50^2 + 60^2} = 87.7Hz$$

このようになりますが、寸法の違うベントを取り付けるのは、余り意味が無いように感じます。

○ ベントの最小必要面積

ベントからの音響出力が大きくなるとそれに見合ったベント内の空気の振動が発生するので大出力時には開口面積を大きくしないと風切りノイズが発生します。

R. H. Small の論文によるとベント内の空気の振動速度は音速 (345m/s) の 4.5% 以下にすべきだとあります。即ち振動速度は約 15m/s 以下にすべきと言う事です。

15m/s 以下に越したことはありませんが現実的には、長すぎるベントになったりしますし、経験的には余り 15m/s に拘らなくてもいいようで臨機応変に行けばいいようです。最終的に音を聞いて問題無ければOKとします。

尚、拙アプリ BoxDesigner は、ベント振動速度のシミュレーションが出来ます。

○ ベントを曲げる

ベントの長さを稼ぐため曲げたくなる事は、多いと思います。筆者も塩ビ管 (VP管) のエルボを使って頻繁に行っています。BOSEなど迷路のようなベント例も見掛けます。数学的には、径が同じならグニャグニャに曲がった管でも中心線が管の長さになりますし体積も直管と同じになります。VP管のエルボならアールが付いているので流体的には良いと思います。紙管やボイド管なら45°にカットして90°に接着すればいいでしょうが90°に拘る根拠は特にありません。VP管エルボは差し込み部分がテーパになっており完全に底まで入り切らないので要注意です。ヤスリで削ればOKです。ベントを短くすると径は細くなりベントのエアーノイズの原因になるので曲げて太くする方が良いと考えます。ただ、余り長くするとベント自体の管共鳴が発生し特性に影響をするので注意が必要です。



写真 1 エルボ使用例

管共鳴の大体の値は（図 2 フランジ+フリー端）

Φ50mm	L=300mm	約 512Hz
Φ25mm	L=300mm	約 541Hz
Φ50mm	L=200mm	約 729Hz
Φ25mm	L=200mm	約 790Hz
Φ50mm	L=100mm	約1262Hz
Φ25mm	L=100mm	約1458Hz

500Hz 以下だと特性への影響が大きくなり、また、径が大きくなると空気付加も多くなり共鳴も低くなります。ベンテッド型でベントが長い場合、管共鳴で中域の特性に暴れが出る可能性がありますし、ベントからの出力のみを測定するのは難しいので予め対策しておくのが良いかも知れません。

塩ビ管・紙管規格は、[こちら](#)

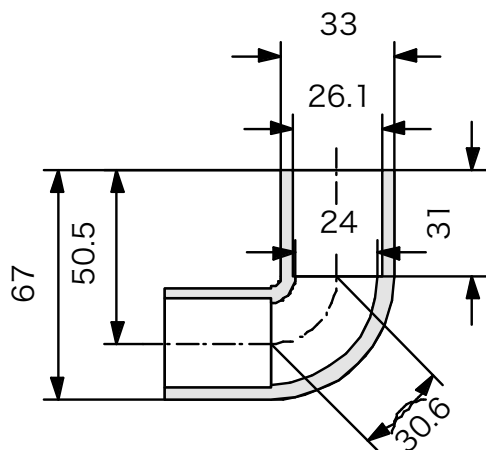


図 7 VP 20 エルボ寸法

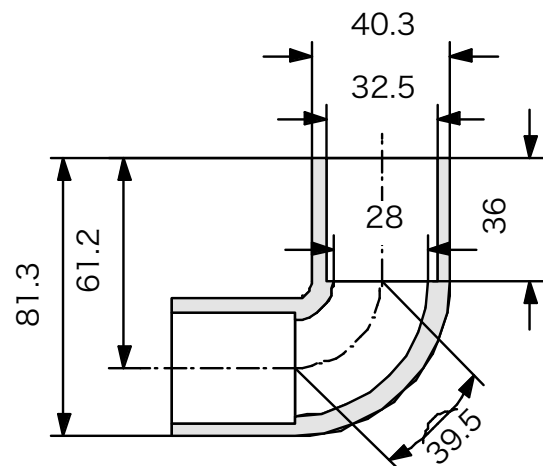


図 8 VP 25 エルボ寸法

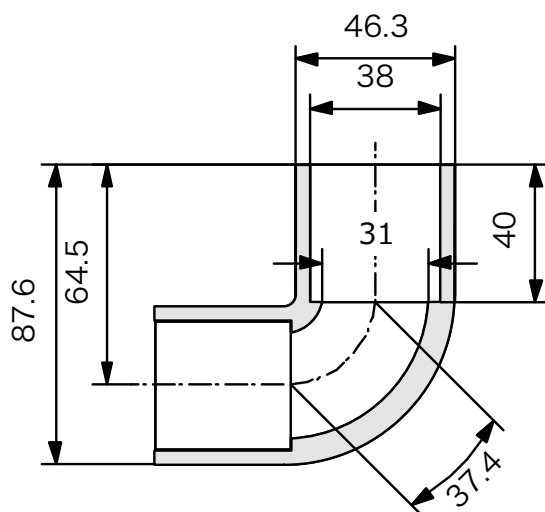


図 9 VP 30 エルボ寸法

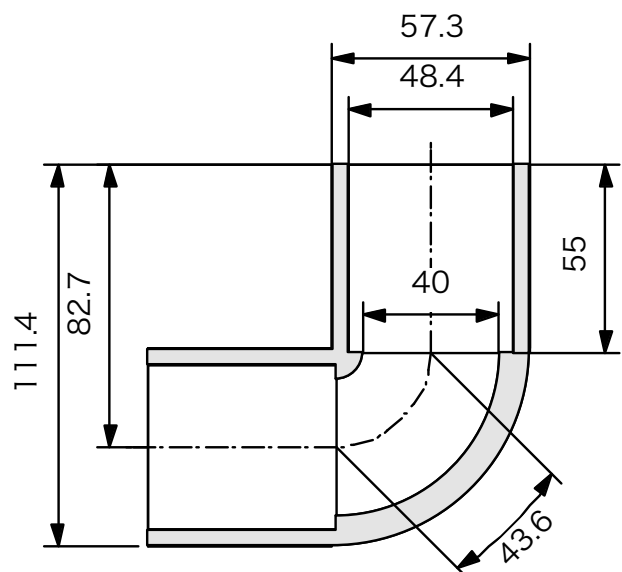


図 10 VP 40 エルボ寸法

○ トンネル ダクト (Tunnel Duct)

ボックスの奥行きに対し最大の寸法を取るようなダクトをトンネルダクトと呼びます。

(ティールの論文より)

このダクトのメリットは、ダクトを曲げることなく最大の開口面積が得られる事です。

工作も比較的楽になります。

この時のダクト寸法は、奥行き”L”で開口高さとし内側開口を”h”とし開口端補正は、図1 両端フランジを摘要します。

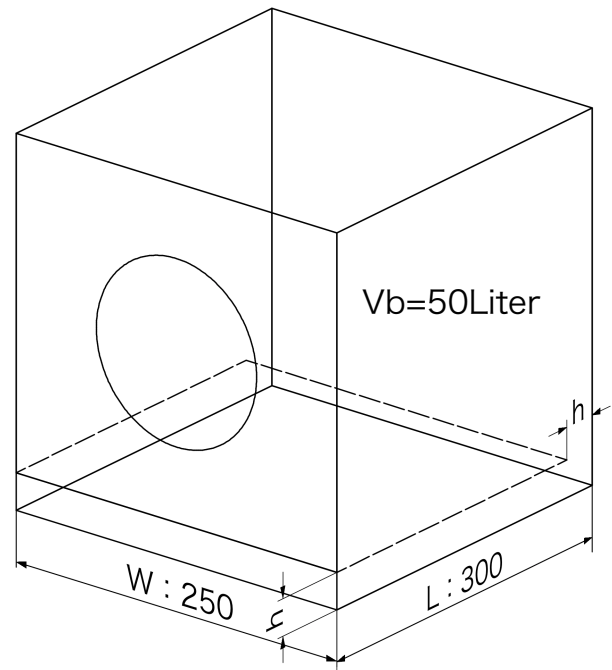


図1 1 トンネルダクト例

◎ トンネル ダクトの計算

式1を2乗し、hを求める。

$$Fb^2 = \left(\frac{c}{2 \cdot \pi} \right)^2 \times \frac{Sv}{L' + Vb}$$

$$= \left(\frac{c}{2 \cdot \pi} \right)^2 \times \frac{W \cdot h}{(L + L'') \cdot Vb}$$

$$h = Fb^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{c} \right)^2 \cdot \frac{Vb}{W} \cdot (L + 0.958 \cdot \sqrt{h^2}) \quad Fb^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{c} \right)^2 \cdot \frac{Vb}{W} = K \quad \text{と置き}$$

$$h = K \cdot (L + 0.958 \cdot h) = K \cdot L + 0.958 \cdot K \cdot h \quad \text{両端フランジ補正 面積}=h^2 \text{ なので}$$

$$h \cdot (1 - 0.958 \cdot K) = K \cdot L \quad h = \frac{K \cdot L}{1 - 0.958 \cdot K} = \frac{L}{1/K - 0.958}$$

◎ 計算例

Fb=40Hz、 Vb=50Liter、 W=250mm、 L=300mm とすると

$$K = Fb^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{c} \right)^2 \cdot \frac{Vb}{W} = \frac{3.3168}{10000} \cdot Fb^2 \cdot \frac{Vb}{W} = \frac{3.3168}{10000} \cdot 40^2 \cdot \frac{50}{250} = 0.10614$$

$$h = \frac{L}{\frac{1}{K} - 0.958} = \frac{300}{\frac{1}{0.10614} - 0.958} = 35.45mm$$

以上、この例では、h=35.45mm にて目的のチューニングが得られる。

○ ベントのQ

ベントの筒としてのQは、Leo. L. Beranek [Acoustics](#) (1993 Edition P131～139) より以下により求められます。

$$Q_v = \sqrt{\frac{S_v \cdot F_b}{\mu}} \times \frac{L + 0.85 \cdot D}{L + D} \dots\dots\dots 7 \text{ 式}$$

μ : 空気の粘性係数 $1.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Sv : ベント面積
Fb : 共振周波数
L : ベントの物理長
D : ベント径

後 項

Q_vの式の後項は、ベント長と開口端補正のQへの貢献度で分子の $0.85 \cdot D$ の部分は、ベント形状による開口端補正值を適応します。

また、各数値の単位を合算すれば無次元量になります。

計算例；ベント径：50mm、 $S_v = 1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、ベント長：100mm、
共振周波数：50Hz、フランジ端＋フリー端ベント、開口端補正： $0.732 \cdot D$

$$Q_v = \sqrt{\frac{1.963e-3 \cdot 50}{1.56e-5}} \times \frac{100 + 0.732 \cdot 50}{100 + 50} = 72.28$$

ベントの Q 値は、大体的場合 50 以上になり特性への影響は無視出来ます。

拙アプリ ResonanceCalc では、ベントのQが計算されます。

○ 吸音装置としてのヘルムホルツ共鳴器

ヘルムホルツ共鳴器は、ホールの定在波の吸収装置に使用されるなどされていますが、その吸音力を算定し設計する事は、パラメータが多く設置条件にもよるので可なり難しく簡易な計算式も存在しないようなので、ここでは深掘りしませんが、容積内に吸音材を入れるなどしてベント効果を調節する事が考えられます。（効果を減少させる方向のみ）

○ ベント設計参考サイト

[英語原文](#)

[Google 翻訳](#)

[ヘルムホルツ共鳴の原理を簡単に説明したサイト](#)

ここに記した内容は、ベントを採用している方式全てに共通している事を最後に記して置きます。

以上、浅学ながらベントについての考察を記述しましたが、
読者の参考になれば幸いです。

※本冊子の著作権はフリーとします。 記：長谷川義之
「ベント（ポート・ダクト）の設計」 改2 2019/05、改3 2021/05