

【整番】FE-23-TM-011 【標題】気体用オリフィスのサイジング方法
分類：流れ(オリフィス)／種別：技術メモ 作成年月：H18.9／改訂：Ver0.0 (H18. 9) 作成者：N.Miyamoto

全8枚

1. はじめに

オリフィスは種々の目的で、管路流れや機器類のインターナルとしてよく使用されている。ここでは、減圧を目的とした気体用オリフィスの圧力損失(圧力降下)の計算式およびサイジング(孔径設定)の手順を紹介する。ただし、次の場合に適用を限る。

- ① オリフィス通過流体は気体であり、液分は含まないこと。
- ② オリフィスは減圧用であって、計測用ではないこと。
- ③ オリフィスは薄刃オリフィスであり、厚肉オリフィスでないこと。
即ち図のように、キリ孔で板肉厚/孔径の比が 0.125 を越えないもの、またはテーパ加工孔のストレート部長さが $d/8$ (0.125d) 以下のもの。
- ④ オリフィス穴は単孔とし、孔位置はオリフィス板中央とする。

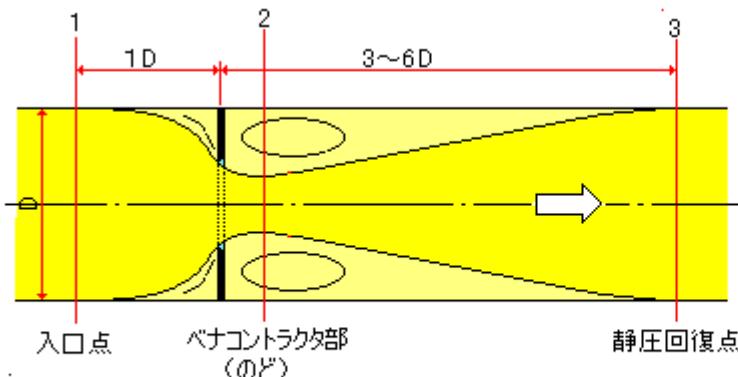


図1 オリフィス流れモデル

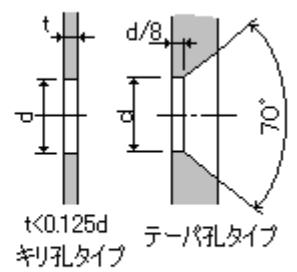


図2 薄刃オリフィス

2. 気体用オリフィス圧損計算式

気体流れ(圧縮性流れ)の場合は、液体流れ(非圧縮性流れ)のように、 $\Delta P = 0.5 K \rho U^2$ といった簡明な関係にはならず、図 1 に示すような区間 1-2、区間 2-3 で成立する式をつないで、以下に示すような手順で、オーバーオールの圧力損失(圧力低下)を求ることになる。

(1) まず、区間1~2において、次の流量-圧力関係式からペナコントラクタ(のど)圧力 P_2 を求める(1)。

$$u_{21} < a_2 \text{ のとき : } q_{m2} = \rho_1 C_c A_d (P_2/P_1)^{1/\gamma} u_{21} \quad \dots \quad (1)$$

$$u_{21} \geqq a_2 \text{ のとき : } q_{m2} = \rho_1 C_c A_d (P_2/P_1)^{1/\gamma} a_2 \quad \dots \quad (2)$$

ここで、 P_1 =上流側静圧(N/m²)、 P_2 =のど静圧(N/m²)、 P_3 =下流側静圧(N/m²)

$$u_{21} = \text{流速 (m/s)} = C_v \left[\left\{ 2 \gamma / (\gamma - 1) \right\} \left(P_1 / \rho_1 \right) \left\{ 1 - (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} \left\{ 1 - m^2 C_c^2 (P_2/P_1)^{2/\gamma} \right\} \right]^{0.5}$$

$$a_2 = \text{流体音速(m/s)} = \left\{ \gamma \left(\frac{P_2}{\rho_1} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-1/\gamma} \right\}^{0.5}$$

q_{m2} = オリフィス通過の質量流量 (kg/s)、 ρ_1 = 入口流体密度 (kg/m³)、 γ = 比熱比 (-)

C_v =速度係数(~ 0.97)

$$C_v \equiv \text{縮流係数}(-) = -0.3(P_2/P_1) + 0.904107 + 0.092754m^2 + 0.072685m^4 + 0.079758m^6$$

$$A_d = \text{孔面積}(m^2) = \pi d^2/4, m = \text{開口面積比} = (d/D)^2, D = \text{管内径}(m), d = \text{孔径}(m)$$

(2) 次に、区間 2~3において、次式⁽¹⁾によって下流側のマッハ数 M_3 を求める。

$$M_2\{2+(\gamma-1)M_2^2\}^{0.5}/\{\gamma M_2^2+(1/m/C_c)\}=M_3\{2+(\gamma-1)M_3^2\}^{0.5}/(1+\gamma M_3^2) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $M_2 = \infty$ のときマッハ数(=) = u_{21}/a_2 (なお $u_{21} > a_2$ のときは $M_2 = 1$ とする。)

$M_3 = \text{下流側マッハ数}(=), \gamma, m = (1)$ と同じ

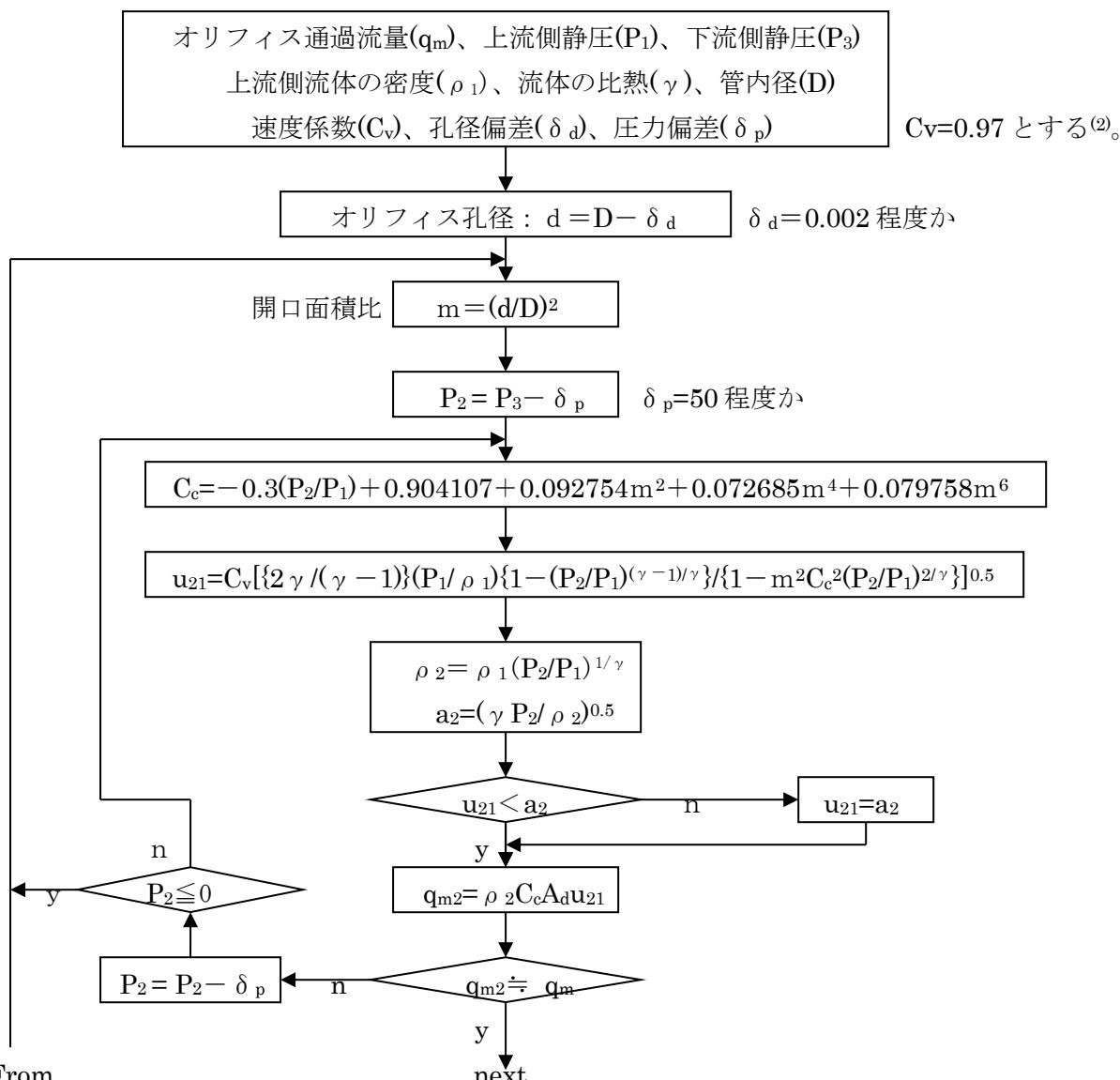
M_3 と M_2 を用いて、次式⁽¹⁾によって下流側静圧 P_3 を求める。

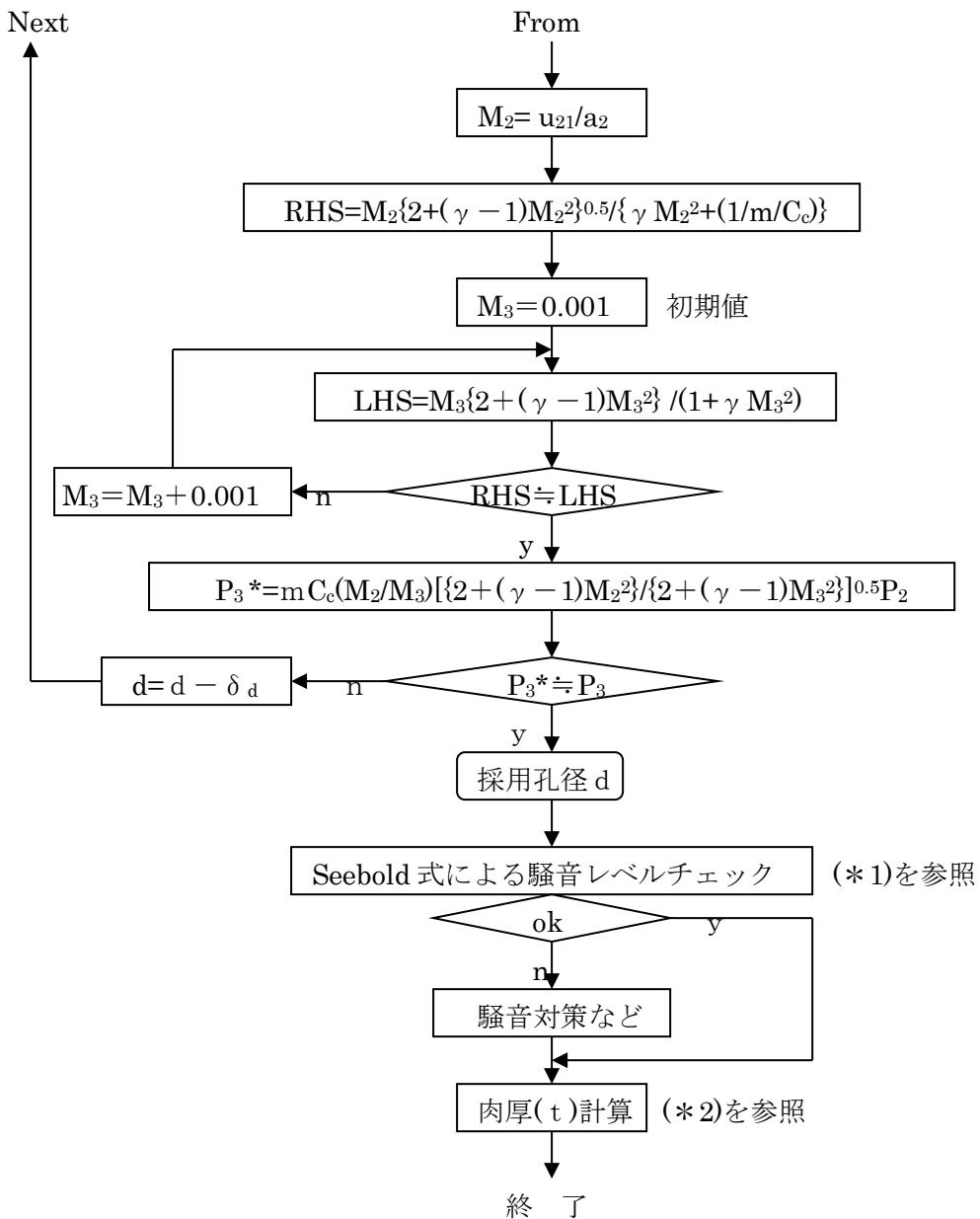
$$P_3 = m C_c (M_2/M_3) [\{2+(\gamma-1)M_2^2\}/\{2+(\gamma-1)M_3^2\}]^{0.5} P_2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

全圧力損失(圧力降下) ΔP は $\Delta P = P_1 - P_3$ となる。

3. サイジング手順

[比熱比 γ 、管径 D 、質量流量 q_m 、上流側圧力 P_1 、上流側密度 ρ_1 および下流側圧力 P_3] が既知の場合のオリフィス孔径の求め方を下記のチャートで例示する。





(注記) このチャートで使用の記号の定義は前項(1)～(4)式にほぼ同じ。

(*1) EE-01-RP-001 「気体配管の騒音の簡易推算方法」

(*2) FE-19-RP-001 「単孔オリフィスの圧損計算とサイジング方法 (液流れ用)」

4. 例 題

300A(内径～300)の配管に薄刃オリフィスをいれて 4 kg/cm^2 (392280 N/m^2)から 2.47 kg/cm^2 まで減圧したい。なお流量 4.19 kg/s 、上流の密度 3 kg/m^3 、比熱比 1.4 である。

手順に従って計算した処、バナコントラクタ静圧 2.2 kg/cm^2 ($21575/392280 \text{ N/m}^2$)、下流マッハ数 0.074 孔径 100mm という結論になった。これを確認してみる。

$$m = (100/300)^2 = 0.1111$$

$$C_c = -0.3(P_2/P_1) + 0.904107 + 0.092754m^2 + 0.072685m^4 + 0.079758m^6$$

$$= -0.3(21575/392280) + 0.904107 + 0.092754 \times 0.1111^2 + \dots = 0.74$$

$$u_{21} = C_v [\{2\gamma / (\gamma - 1)\}(P_1 / \rho_1) \times \{1 - (P_2/P_1)^{(\gamma - 1)/\gamma}\} / \{1 - m^2 C_c^2 (P_2/P_1)^{2/\gamma}\}]^{0.5}$$

$$= 0.97 [\{7(392280/3) \times \{1 - (21575/392280)^{0.2857}\} / \{1 - 0.1111^2 \times 0.74^2 \times (21575/392280)^{1.42857}\}\}]^{0.5}$$

$$= 928 * ((1 - 0.55^{0.2857}) / (1 - 0.0064 \times 0.55^{1.4286}))^{0.5} = 928 \times (0.157 / 0.997)^{0.5} = 368 \text{ m/s}$$

$$q_m = \{ \rho_1 (P_2 / P_1)^{1/\gamma} \} C_c A_d u_{21} = 3 \times 0.55^{0.714286} \times 0.74 \times 0.007856 \times 368 = 4.19 \text{ kg/s} \quad \text{OK}$$

$$\rho_2 = \rho_1 (P_2 / P_1)^{1/\gamma} = 3 \times 0.55^{0.7143} = 1.957, \quad a_2 = (\gamma P_2 / \rho_2)^{0.5} = (1.4 \times 215754 / 1.957)^{0.5} = 393 \text{ m/s}$$

$$M_2 = u_{21} / a_2 = 368 / 393 = 0.9364, \quad M_3 = 0.074 \text{ であるから}$$

$$(4) \text{式の右辺} = M_2 \{ 2 + (\gamma - 1) M_2^2 \}^{0.5} / \{ \gamma M_2^2 + (1/m) C_c \}$$

$$= 0.9364 \{ 2 + 0.4 \times 0.9364^2 \}^{0.5} / \{ 1.4 \times 0.9364^2 + (1/0.1111) / 0.074 \} = 0.1046$$

$$(3) \text{式の左辺} = M_3 \{ 2 + (\gamma - 1) M_3^2 \}^{0.5} / (1 + \gamma M_3^2) = 0.074 \{ 2 + 0.4 \times 0.074^2 \}^{0.5} / (1 + 1.4 \times 0.074^2)$$

$$= 0.1041$$

ほぼ合致するので、 $M_3 = 0.074$ は OK

$$P_3 = m C_c (M_2 / M_3) \{ \{ 2 + (\gamma - 1) M_2^2 \} / \{ 2 + (\gamma - 1) M_3^2 \} \}^{0.5} P_2$$

$$= 0.1111 \times 0.74 \times (0.9364 / 0.074) \times \{ (2 + 0.4 \times 0.9364^2) / (2 + 0.4 \times 0.074^2) \}^{0.5} \times 215754 = 243214 \text{ N/m}^2$$

$$= 2.48 \text{ kg/cm}^2$$

$(2.48 - 2.2) = 0.28 \text{ kg/cm}^2$ がベナコントラクタからの静圧回復分になっている。

【解説】

1. JIS Z8762 「絞り機構による流量測定方法」によれば、気体用オリフィスの流量式は次のようになる。

$$q_m = \alpha \varepsilon (\pi d^2 / 4) (2 \Delta P \rho_1)^{0.5}$$

ここで $\alpha = \text{流量係数} = \{ 0.5959 + 0.0312 \beta^{2.1} - 0.1840 \beta^8 + 0.0029 \beta^{2.5} (10^6 / R_{eD})^{0.75} \} / (1 - \beta^4)^{0.5}$

$\beta = \text{絞り直径比} = d/D, \quad d = \text{孔径(m)}, \quad D = \text{管内径(m)}$

$R_{eD} = D$ に関するレイノルズ数 = $UD / \nu, \quad U = \text{管内平均流速(m/s)}, \quad \nu = \text{動粘度(m}^2/\text{s)}$

$\varepsilon = \text{膨張補正係数} = 1 - (0.41 + 0.35 \beta^4) (\Delta P / \gamma P_1) \quad (\text{縮流タップ位置にて})$

$\Delta P = \text{入口側} \sim \text{ベナコントラクタの圧力降下} = P_1 - P_2 \text{ (Pa)}$

$P_1 = \text{オリフィス入口圧力(Pa)}, \quad P_2 = \text{縮流タップ位置(ベナコントラクタ)の圧力(Pa)}$

この式は、液体流れ(非圧縮性流れ)のオリフィス通過流量 $q_m = \alpha (\pi d^2 / 4) (2 \Delta P \rho_1)^{0.5}$ に膨張補正係数 ε を乗じたものである。この式を変形すると次の ΔP 式が得られる。

$$\Delta P = q_m^2 / \{ 2 \rho_1 (\alpha \varepsilon)^2 (\pi d^2 / 4)^2 \}$$

しかし右辺の ε にも ΔP が含まれるので、結局 ΔP を求めるには、3次の代数方程式を解くことになり、端的な ΔP の代数式は得難く数値的に計算にせざるを得ない。また本来、計測用オリフィスを対象としているので、この式の圧力降下 ΔP は入口から縮流部(のどまたはベナコントラクタ)までであり、縮流部から下流の静圧回復点までは、新たに計算する必要がある。実際、縮流以降は静圧が幾分回復するので、この ΔP をもってオリフィス流れの圧力損失にしてしまうと結果が合わなくなる。

さらに、この式は、 $(P_2 / P_1) > 0.75$ 、即ち減圧の少ない亜音速流れを前提としており、限界圧力比に近いあるいは越える減圧比の場合は、実際とのずれが大きくなる。

以上のように、計測用オリフィスに関する JIS Z8762 を転用して減圧用途の制限オリフィスの圧損計算をするのは問題が多すぎる。そこで本 TS では、圧縮性流体テキスト⁽¹⁾に準拠して新たに気体用の制限オリフィスの圧損計算/サイジング方法を提案している。

(なお、本 TS の方法は多少面倒である。減圧比が小さく概略の見積りでよければ添付のような簡易法があるものので参考のこと。)

2. 計算式(1)(2)は、図 1 の区間 1-2 の縮小流れに対して連続式/エネルギー式/等エントロピ式を用いて得られたものである⁽¹⁾。即ち

$$\text{連続の式: } q_m = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$$

$$\text{エネルギー式: } u_1^{2/2} + \{\gamma / (\gamma - 1)\} (P_1 / \rho_1) = u_2^{2/2} + \{\gamma / (\gamma - 1)\} (P_2 / \rho_2)$$

$$\text{エントロピ式: } \rho_2 / \rho_1 = (P_2 / P_1)^{1/\gamma}$$

$$u_2 = C_v \{2 \gamma / (\gamma - 1)\} (P_1 / \rho_1) \{1 - (P_2 / P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}\} / \{1 - m^2 (P_2 / P_1)^{2/\gamma}\}^{0.5}$$

$$q_{m2} = \rho_1 A_2 (P_2 / P_1)^{1/\gamma} u_2$$

実際の流れは孔直後に縮流/減速が起きるので、縮流係数 C_c 、速度係数 C_v を用いて

$$u_2 = C_v \{2 \gamma / (\gamma - 1)\} (P_1 / \rho_1) \{1 - (P_2 / P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}\} / \{1 - m^2 C_c^2 (P_2 / P_1)^{2/\gamma}\}^{0.5}$$

$$q_{m2} = \rho_1 C_c A_2 (P_2 / P_1)^{1/\gamma} u_2$$

しかし、 u_2 が音速 a_2 を超えるとチョークして、

$$u_2 = a_2$$

$$q_{m2} = \rho_1 C_c A_d (P_2 / P_1)^{1/\gamma} a_2$$

計算式(3)(4)は、図 1 の区間 2-3 の拡大流れに対して、急拡大モデル⁽¹⁾を適用したもの。即ち

$$\text{連続式: } q_m = \rho_2 u_2 A_2 = \rho_3 u_3 A_3$$

$$\text{運動量式: } P_2 A_2 + P_f (A_3 - A_2) + \rho_2 u_2^2 A_2 = P_3 A_3 + \rho_3 u_3^2 A_3$$

$$\text{エネルギー式: } u_2^{2/2} + \{\gamma / (\gamma - 1)\} (P_2 / \rho_2) = u_3^{2/2} + \{\gamma / (\gamma - 1)\} (P_3 / \rho_3)$$

$$M_2 \{2 + (\gamma - 1) M_2^2\}^{0.5} / \{\gamma M_2^2 + (1/m/C_c)\} = M_3 \{2 + (\gamma - 1) M_3^2\}^{0.5} / (1 + \gamma M_3^2)$$

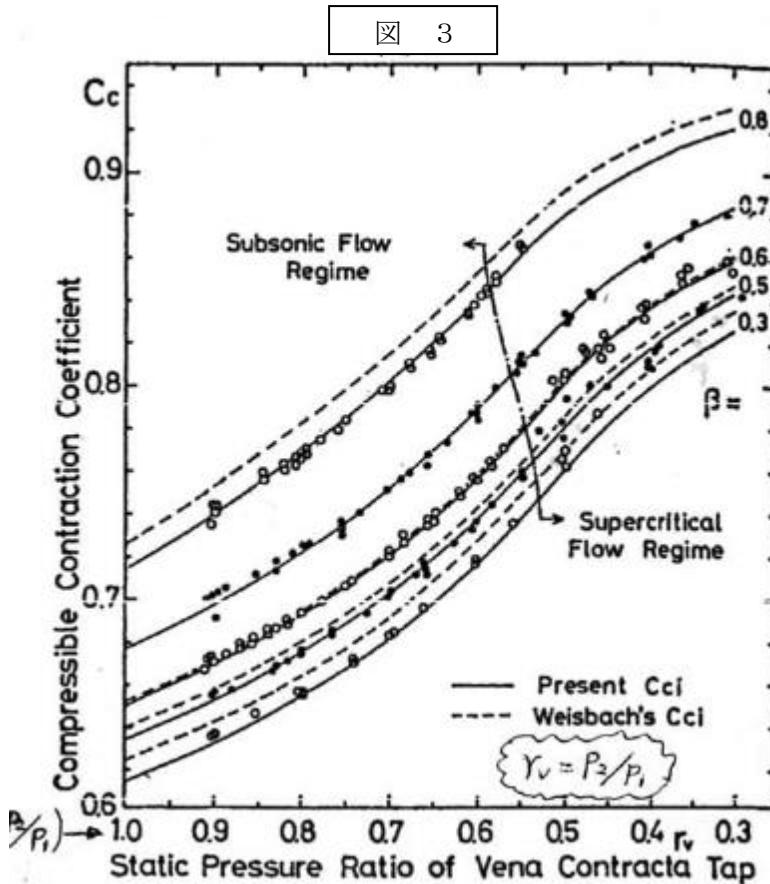
$$P_3 / P_2 = m C_c (M_2 / M_3) [\{2 + (\gamma - 1) M_2^2\} / \{2 + (\gamma - 1) M_3^2\}]^{0.5}$$

なお P_f はオリフィスの 2 次側背面に働く圧力であるが、ここでは $P_f = P_2$ として近似的に扱っている。
のどのマッハ数 M_2 が 1 に近づくにつれて、この近似では誤差が大きくなるかも知れない。

圧損計算など通常のエンジニアリング計算では式(1)～(4)だけで十分用が足りる。サイジング手順では計算式(1)～(4)を数値的に計算してオリフィス孔径を求めており、減圧用途のサイジングであれば、多少誤差があっても問題が深刻になることは少ないので、特に厳密なプログラム計算は必要だろう。

3. (1)～(4)式の係数 C_c, C_v について。速度係数 C_v は 1 に近い数値であるから計算にも余り影響しない。しかし、縮流係数 C_c はかなり計算結果に影響する。非圧縮性流れの C_c は殆ど、開口比(絞り比)m の関数であるが、圧縮性流れの C_c はマッハ数 M によっても変化する。これに関して、文献(2)に下図の実験データが示されている。この図に示される曲線は、

$C_c = -0.3(P_2/P_1) + 0.904107 + 0.092754m^2 + 0.072685m^4 + 0.079758m^6$
でごく近似的に扱える。本 TS ではこれを縮流係数の式として使用している。



4. オリフィス流れのチョークは、ベナコントラクタの流速が音速以上になったときに起きるが、これは通常、限界圧力比で表現されることが多い。この限界圧力比(P_2/P_1)_cは、ベナコントラクタの流速即ち

$$u_{21} = C_v \left\{ \frac{2\gamma}{(\gamma-1)} \left(\frac{P_1}{\rho_1} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} / \left\{ 1 - m^2 C_c^2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma} \right\} \right\}^{0.5}$$

を音速 $a_2 = (\gamma P_2 / \rho_2)^{0.5}$ に等値した式、

$$C_v^2 \left\{ \frac{2\gamma}{(\gamma-1)} \left(\frac{P_1}{\rho_1} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} \right\} = (\gamma P_2 / \rho_2) \left\{ 1 - m^2 C_c^2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma} \right\} \quad \text{----- (i)}$$

を(P_2/P_1)即ち(P_2/P_1)_cについて解いて得られる。オリフィス噴流がチョークするか否かは重要である。

ベナコントラクタのない流れ例えばノズル/ベンチュリからの噴流では、 $C_v=1$ 、 $C_c=1$ とおけるので

$$\left\{ \frac{2\gamma}{(\gamma-1)} \left(\frac{P_1}{\rho_1} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} \right\} = (\gamma P_2 / \rho_2) \left\{ 1 - m^2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma} \right\}$$

これを変形して

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(1-\gamma)/\gamma} + \left\{ (\gamma-1)/2 \right\} m^2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma} = (\gamma+1)/2 \quad \text{----- (ii)}$$

この式は、限界圧力比の式として文献や資料によくでてくる。

(ただし、(ii)の解(P_2/P_1)_cをもってオリフィス噴流の限界圧力とする文献が多いのが気になる。今後この辺をクリアにしてゆきたい。)

引用文献 :

- (0) JIS Z8762-1988 「絞り機構による流量測定方法」
- (1) 「圧縮性流体力学(内部流れの理論と解析)」 松尾一泰 (理工学社) 7.1 および 7.3
- (2) 鳥住、平山、前田 「圧縮性流れにおける管オリフィスの高速流動特性と流量計算法」

【添付. 簡易的にオリフィス流れの全圧損を求める方法(参考)】

流体物性、管サイズ、質量流量 q_m 、上流側圧力/密度 P_1/ρ_1 、下流側圧力 P_3 は既知として以下のステップで孔径を求める。

ステップ 1. 孔径を設定する。

ステップ 2. まず孔直後のベナコントラクタ静圧 P_2 を次式で推定する。

$$P_2 = P_1 - \{(1 + \alpha m)/(1 - \alpha m)\}(P_1 - P_3)$$

ここで P_1 =上流側静圧(N/m²)、 P_2 =のど静圧(N/m²)、 P_3 =下流側静圧(N/m²)

$$\alpha = \text{流量係数} = \{0.5959 + 0.0312m^{1.05} - 0.1840m^4 + 0.0029m^{1.25}\} / (1 - m^2)^{0.5}$$

$$m = \text{開口面積比} = (d/D)^2, d = \text{孔径(m)}, D = \text{管内径(m)}$$

ステップ 3. 表 1 より限界圧力比(P_2/P_1)_c を求める。

ステップ 4. 次の式でオリフィスを通過する質量流量 q_m を計算する。

$$(P_2/P_1) > (P_2/P_1)_c : q_m = \alpha \varepsilon (\pi d^2/4)(2 \Delta P \rho_1)^{0.5}$$

$$(P_2/P_1) \leq (P_2/P_1)_c : q_m = \rho_1 C_{cc} (\pi d^2/4)(P_2/P_1)^{1/\gamma} a$$

ここで、 q_m =オリフィス通過の質量流量(kg/s)

$$P_1 = \text{上流側静圧(N/m}^2\text{)}、P_2 = \text{のど静圧(N/m}^2\text{)}、\Delta P = P_1 - P_2$$

$$a = \text{流体の音速(m/s)} = [\gamma P_2 / \{\rho_1 (P_2/P_1)^{1/\gamma}\}]^{0.5}$$

$$\alpha = \text{流量係数} = \{0.5959 + 0.0312m^{1.05} - 0.1840m^4 + 0.0029m^{1.25}\} / (1 - m^2)^{0.5}$$

$$\varepsilon = \text{膨張補正係数} = \{1 - (0.41 + 0.35m^2) (\Delta P / \gamma P_1)\}$$

$$C_{cc} = \text{圧縮性流れの縮流係数}$$

$$= -0.3(P_2/P_1) + 0.0904107 + 0.092754m + 0.072685m^2 + 0.079758m^3$$

$$m = \text{開口面積比} = (d/D)^2, d = \text{孔径(m)}, D = \text{管内径(m)}, \gamma = \text{比熱比}$$

ステップ 5. 上記で計算した質量流量 q_m が略々、所定の流量と等しい場合は騒音をチェックし肉厚を算定して終了。流量が合わないなら、ステップ 2-5 を繰り返す。

表 1 オリフィス圧力比(P_j/P_i)の限界値(音速発生限界)

(d/D)	断熱比 γ								
	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.667
0.00	0.5847	0.5744	0.5645	0.5550	0.5458	0.5369	0.5283	0.5200	0.4872
0.20	0.5849	0.5746	0.5647	0.5552	0.5460	0.5371	0.5285	0.5202	0.4874
0.40	0.5877	0.5775	0.5675	0.5580	0.5489	0.5401	0.5315	0.5232	0.4905
0.50	0.5923	0.5820	0.5722	0.5627	0.5537	0.5450	0.5364	0.5280	0.4956
0.60	0.6006	0.5905	0.5809	0.5715	0.5625	0.5538	0.5454	0.5372	0.5050
0.65	0.6072	0.5972	0.5877	0.5784	0.5694	0.5609	0.5526	0.5444	0.5124
0.70	0.6159	0.6061	0.5968	0.5875	0.5788	0.5703	0.5620	0.5541	0.5223
0.75	0.6280	0.6183	0.6092	0.6002	0.5914	0.5832	0.5750	0.5673	0.5358
0.80	0.6440	0.6347	0.6258	0.6171	0.6084	0.6005	0.5925	0.5849	0.5542
0.85	0.6671	0.6580	0.6496	0.6412	0.6332	0.6251	0.6177	0.6104	0.5809

本表は Applied Fluid Dynamic Handbook by R.D.Blevins (Van Nostrand Reinhold Co.) の Table 6-9 をそのまま引用したもの。