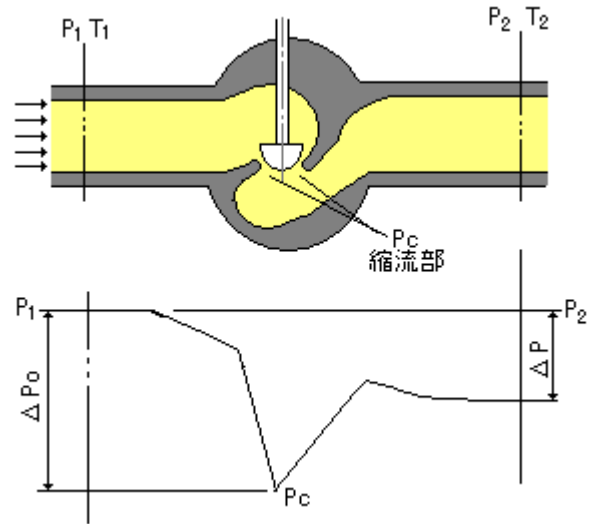


【整番】 EE-24-TM-006	【標題】 チョーク弁の流量についての情報	
分類：流れ(バルブ)／種別：技術メモ	作成年月：H18.9／改訂：Ver0.0 (H18. 10)	作成者：N.Miyamoto

全 5 枚

1. 弁の前後差圧がある限度(限界圧力)をこえると、それ以降はチョークして弁通過流量はそれ以上増えずある限界に留まる。この限界流量の計算式にはいろいろあるようであるが混乱が見られるので、以下で議論してみたい。



2. 各種資料に現れる限界流量式は次のようである。

(a) テキスト⁽¹⁾の式： $m_c = A_e P_o / (RT_o)^{0.5} [\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$ -----(a1)

$m_c = A_e P_1 / (RT_1)^{0.5} [\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$ -----(a2)

(b) Miller⁽²⁾の式： $m_c = A_a [\gamma^{0.5} / \{1 + (\gamma - 1) / 2\}^{(\gamma + 1) / 2} / (\gamma - 1)] \{P_{t1} / (RT_1)^{0.5}\}$ -----(b1)

$m_c = A_a P_1 / (RT_1)^{0.5} [\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$ -----(b2)

$= 0.0244 A_v C_1 \{P_1 / (RT_1)^{0.5}\} [\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$ -----(b3)

$= 5.856 \times 10^{-7} C_v C_1 \{P_1 / (RT_1)^{0.5}\} [\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$ -----(b4)

(c) HTFS FM11⁽³⁾の式： $m_c = \{P_{ind} v^2 C_f / (116.4 k_v^{0.5})\} [(\gamma M / T_{in}) \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$ -----(c1)

$= 1.857 \times 10^{-7} C_f C_v P_{in} [(\gamma M / T_{in}) \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$ -----(c1)

$m_c = 1.694 \times 10^{-5} C_f C_v \{P_1 / (RT_1)^{0.5}\} [\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$ -----(c2)

(d) ISA-S75.01⁽⁴⁾の式： $M_c = N_8 Y F_p P_1' C_v \{F_{kxT} M / T_1\}$ -----(d1)

$m_c = 2.4 \times 10^{-5} Y F_p C_v \{P_1 / (RT_1)^{0.5}\} (F_{kxT})^{0.5}$ -----(d2)

ここで m_c = 限界流量(kg/s)、 M_c = 限界流量(kg/hr)

P_o, T_o = 淀み点(流速零)の全圧力(Pa),全温度(K)、 P_{t1}, T_{t1} = 入口全圧力(Pa),全温度(K)、
 P_{in}, T_{in} = 入口圧力(静圧 Pa),温度(静温 K)、 P'_1 = 入口圧力(静圧 bar)
 P_1, T_1 = 入口圧力(静圧),温度(静温)(K)
 A_e = 先細ノズル出口面積(m²)、 A_a = 基準流れ面積(m²) = $0.0244 A_v C_1 = 5.856 \times 10^{-7} C_v C_1$
 M = モル質量(分子量)、 R = 気体定数(J/kg/K)、 γ = 比熱比(-)、 N_8 = 換算係数(94.8)
 F_p = 配管形状係数(弁の前後にレデューサを付けないときは $F_p=1$)
 C_v = 弁容量係数(US 単位)、 A_v = 弁容量係数(SI 単位) = $24 \times 10^{-6} C_v$ 、
 k_v = 弁容量係数(EU 単位) = $2.14 \times 10^9 d_v^4 / C_v^2$ (但し d_v = 弁出口径)
 C_1 = ガスフロー係数(-)、 C_f = 限界流れ係数(-)、 Y = 膨張係数(=0.667)、
 F_k = 比熱比係数(= $\gamma / 1.4$)、 x_T = 圧力降下比係数(-)
 (弁の前後に絞りレデューサが付く時は x_T の代りに x_{TP} を適用する)

これらの式では (a₁),(b₁),(c₁),(d₁)式がオリジナルの式を示している。(a)~(c)の式は、明らかに同種の式であり、テキストの(a)式が(b)(c)式のベースになっている。即ち(a)式の A_e が $(0.0244 A_v C_1)$ あるいは $(1.694 \times 10^{-7} C_f C_v)$ になっている。然るに、(d)式はこれらとフォームが違っている。

3. 以下、(a)~(d)式について個別に議論する。

(1) (a)式について。テキスト⁽¹⁾によれば、(a₁)式は次のように導かれる。

等エントロピー関係： $\rho = \rho_o (P/P_o)^{1/\gamma} = P_o / (RT_o) (P/P_o)^{1/\gamma}$

ベルヌーイの式： $u^2/2 + \{\gamma / (\gamma - 1)\} (P_o / \rho_o) (P/P_o)^{(\gamma-1)/\gamma} = \gamma / (\gamma - 1) (P_o / \rho_o)$

これらの関係を先細ノズルに適用すると、ノズル出口の流速及び質量流量は、

$$u = [\{2\gamma / (\gamma - 1)\} (P_o / \rho_o) \{1 - (P_b/P_o)^{(\gamma-1)/\gamma}\}]^{0.5}$$

$$m = \rho u A_e = A_e P_o / (RT_o)^{0.5} [\{2\gamma / (\gamma - 1)\} \{(P_b/P_o)^{2/\gamma} - (P_b/P_o)^{(\gamma+1)/\gamma}\}]^{0.5}$$

なお、ここでは先細ノズルを考え $P = P_b$ 即ちノズル出口圧イコール背圧(2 次圧)であるとしている。

チョークは $(P_b/P_o) = \{2/(\gamma+1)\}^{\gamma/(\gamma-1)}$ になった時に起きるのでこれを上式に代入して、テキスト式

$$m_c = A_e P_o / (RT_o)^{0.5} [\gamma \{2/(\gamma+1)\}^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}]^{0.5}$$

が得られる。通常、入口流速はマッハ 0.2 以下であるから、入口側の全圧力(P_o) を静圧(P_1)とおいても大きな誤差を生じることはないので、

$$m_c \doteq A_e P_1 / (RT_1)^{0.5} [\gamma \{2/(\gamma+1)\}^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}]^{0.5}$$

となる。テキストでは右辺の $[\gamma \{2/(\gamma+1)\}^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}]^{0.5}$ は限界流れ係数と呼ばれるが、 C_f には当たらない。

この式では A_e はノズル出口面積であるが、弁のスロットル通過部では幾何的な絞り面積以外に、

【縮流(ベナコントラクタ)】 および 【のど流速変化】 を考慮する必要がある。

(2) (b)式について。(b)式は Miller のテキスト式であるが、(a)式の A_e に対して、レファレンスエリア $A_a = 0.0244 A_v C_1 = 5.856 \times 10^{-7} C_v C_1$ を引き当てている。その背景についてテキストに懇切な説明がないのでわからないが、とにかく変数($C_v C_1$)が面積(m²)のディメンジョンを持つのは確かである (C_1 はガスフロー係数と呼ばれるが、残念ながら情報が乏しくその定義は曖昧である)。

(3) (c)式について。(c)式は HTFS の技術シート FM11 に記載されている式であり、 A_e に対して $(1.69 \times 10^{-5} C_f C_v)$ を引き当てている。Baumann によれば⁽⁵⁾、限界流れ係数 C_f は、

$$C_f = (\Delta P / \Delta P_0)^{0.5} = \{(P_1 - P_2) / (P_1 - P_0)\}^{0.5}$$

であって、縮流部の”圧力降下に対する全圧力降下の割合”即ち静圧回復の程度を表している。また弁の容量係数 C_v は、

$$C_v = q / (\Delta P / \rho)^{0.5} = q / u \rightarrow A$$

で定義されるので、

$$C_f C_v = (\Delta P / \Delta P_0)^{0.5} \cdot q / (\Delta P / \rho)^{0.5} = q / (\Delta P_0 / \rho)^{0.5} = q / u_e = A_e (< A)$$

従って、 $m_c = A_e P_0 / (RT_0)^{0.5} [\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5} m_c = C_f C_v P_0 / (RT_0)^{0.5} [\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}]^{0.5}$
(c₂)式はこの式に単位換算係数 1.69×10^{-5} を乗じたものである。

- (4) (d)式について。この式は理論式(a₂)およびその実用式(b₄)(c₂)とは異なっている。ポイントは膨張係数 Y である。これは、

圧縮性流れの流量(M_c) / 非圧縮性流れの流量(M_{ic})の比
を示している。従って、圧縮性流れの質量流量は、

$$\begin{aligned} M_c &= Y M_{ic} = \rho_1 N Y F_p C_v (\Delta P / \rho_1) = \{P_1 / (RT_1)\} N Y F_p C_v [\{P_1 / (RT_1)\} \Delta P] \\ &= N Y F_p C_v P_1 [\{1 / (RT_1)\} (\Delta P / P_1)] \quad (N \text{ は換算係数}) \end{aligned}$$

ここで $(1/R) \propto M$ 、 $(\Delta P / P_1) = x$ であるから、

$$M_c = N Y F_p P_1 C_v \{x M / T_1\}$$

ここで、弁がチョークするとき、圧力比 $x = \Delta P / P_1 = F_{kxT}$ であるから、

$$M_c = N_8 Y F_p P_1 C_v \{F_{kxT} M / T_1\}$$

なお、ANSI/ISA-S75.01-1985 によれば、膨張係数 Y は次のように定義される。

$$x < (F_{kxT} \text{ または } F_{kxTP}) \text{ のとき: } Y = 1 - \{x / (3F_{kxT})\} \text{ または } 1 - \{x / (3F_{kxTP})\}$$

$$x \geq (F_{kxT} \text{ または } F_{kxTP}) \text{ のとき: } Y = 0.667 \text{ (一定)}$$

即ち、チョークが起きると $Y=0.667$ に達して変化しない。また上記の M_c 式に含まれる x_T も弁内の流れ構造によって決まるチョーク限界を表すもので一定である。従って、チョーク状態では入口側の P_1/T_1 を変更しない限りは、弁通過流量(限界流量)は変わらない。またチョーク後は弁前後の差圧 ΔP の寄与は全くないので、いくら P_2 を下げても流量は増えない。

(この項、FE-24-TM-005「ANSI/ISA-S75.01-1985 による制御弁の C_v 計算」を参照のこと。)

4. 弁がチョークするときの出口側圧力 P_2 を限界圧力 P_c と云うが、これについて多少議論しておく。

ANSI/ISA-S75.01 によれば、前述のように、圧力比 $[\Delta P / P_1 = F_{kxT}]$ の時にチョークがおきる。

$\Delta P / P_1 = (P_1 - P_2) / P_1 = 1 - P_2 / P_1 = F_{kxT}$ より $P_2 = (1 - F_{kxT}) P_1$ であるから

$$P_c = P_2 = (1 - F_{kxT}) P_1 \quad \text{-----}(y_1)$$

なお、弁の前後にレディーサが付くときは $x_T = x_{TP}$ とする。圧力降下比係数 x_T は弁の空気テストから決められた値で、弁メーカーから提供される。 x_{TP} はこれをレディーサ寸法で補正して得られる。

Miller の式ではチョーク判定はややこしい。詳細は FE-02-RP-002「弁廻りの圧縮性流れ計算」による。

HTFS FM11 の式では、スロットル部分の圧力比 $P_2/P_1 = \{2 / (\gamma + 1)\}^{\gamma / (\gamma - 1)}$ のときにチョークするので定義式の $C_f = (\Delta P / \Delta P_0)^{0.5} = \{(P_1 - P_2) / (P_1 - P_0)\}^{0.5}$ にこれを代入して、限界圧力は

$$P_c = P_2 = [(1 - C_f^2) + \{2 / (\gamma + 1)\}^{\gamma / (\gamma - 1)} C_f^2] P_1 \quad \text{-----}(y_2)$$

5. Miller の式(b₄)、HTFS の式(c₂)及び ANSI/ISA-S75.01 の式(d₂)を、下記の例題で比較してみる。

239bar から 51bar まで 20℃天然ガスを減圧する 2inch 高圧アングル弁がある。ここで

弁の C_v 値は 3.8、C_f 値は 0.55、C₁ 値は $37 \times 0.55^2 = 27.4$ 、x_T 値は 0.47 (*1 参照)

ガス定数は 520J/kg/ K、比熱比は 1.3、

この場合の質量流量 m を求めよ。

=====

まず、チョークの可否について。

ISA-S75.01 (y₁) 式 : $P_c = \{1 - (1.3/1.4) \times 0.6\} \times 239 = 106 \text{ bar} > 51 \text{ bar} \rightarrow \text{チョーク}$

HTFS (y₂) 式 : $P_c = [(1 - 0.55^2) + \{2/(1.3+1)\}^{4.33} \times 0.55^2] \times 239 = 206 \text{ bar} > 51 \text{ bar} \rightarrow \text{チョーク}$

従って、チョークは確実であるので、限界流速を Miller/HTFS/ISA-S75.01 から求める。

Miller(b₄) 式 : $m_c = 5.856 \times 10^{-7} \times 3.8 \times 27.4 \times 239 \times 10^5 / (520 \times 293)^{0.5} \times \{1.3 \times (2/2.3)^{7.667}\}^{0.5}$
 $= 6.097 \times 10^{-5} \times 0.612 \times 10^5 \times 0.667 = 2.49 \text{ kg/s}$

HTFS(c₂) 式 : $m_c = 1.69 \times 10^{-5} \times 0.55 \times 3.8 \times 0.612 \times 10^5 \times 0.667$
 $= 3.532 \times 10^{-5} \times 0.612 \times 10^5 \times 0.667 = 1.44 \text{ kg/s}$

ISA-S75.01(d₂) 式 : $m_c = 2.4 \times 10^{-5} \times 0.667 \times 3.8 \times 0.612 \times 10^5 \times \{(1.3/1.4) \times 0.47\}^{0.5}$
 $= 6.083 \times 10^{-5} \times 0.612 \times 10^5 \times 0.66 = 2.46 \text{ kg/s}$

Miller ベース(b₄)式の結果と ISA-S75.01(d₂)式の結果は殆ど合致しているが、HTFS(c₂)式の結果は、これらの結果の約半分程度であって大きく食い違う。よくわからないが、式の定数値に誤りではないか？
結論的には、HTFS の限界流量式は使うべきでない。

(* 1) FE-02-RP-002 「弁廻りの圧縮性流れ計算」で示すように、Miller のテキストでは

$$C_1 = 40 x_T^{0.5} = 37 x C_f^{0.5} \rightarrow C_f = 1.1664 x_T$$

であるから、C_f = 0.55 に対し $C_1 = 37 \times 0.55^{0.5} = 27.4$ 、 $x_T = 0.55/1.1664 = 0.47$

6. 結 論

HTFS FM11 の式には誤りがあるようなので使用せず下記のいずれかの式を限界流量の計算に用いる。

Miller 文献の式 : $m_c = 5.856 \times 10^{-7} C_v C_1 \{P_1/(RT_1)^{0.5}\} [\gamma \{2/(\gamma + 1)\}^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)}]^{0.5}$

ANSI/ISA-S75.01 の式 : $m_c = 2.4 \times 10^{-5} Y C_v \{P_1/(RT_1)^{0.5}\} (F_k x_T)^{0.5}$

ここで m_c = 限界流量(kg/s)、P₁, T₁ = 入口圧力(静圧), 温度(静温)(K)

R = 気体定数(J/kg/K)、γ = 比熱比(ー)、N_s = 換算係数(94.8)

C_v = 弁容量係数(US 単位)、C₁ = ガスフロー係数(ー)、C_f = 限界流れ係数(ー)、

Y = 膨張係数(= 0.667 = 一定)、F_k = 比熱比係数(= γ/1.4)、x_T = 圧力降下比係数(ー)

(弁の前後に絞りレデューサが付く時は x_T の代りに x_{TP} を適用すること。x_{TP} は

FE-24-TM-005 「ANSI/ISA-S75.01-1985 による制御弁の C_v 計算」参照のこと)

また、チョークの判定は、ANSI/ISA-S75.01 の規定を採って次式によるものとする。

$$P_2 > (1 - F_k x_T) P_1$$

(弁の前後に絞りレデューサが付く時は x_T の代りに x_{TP} を適用すること。)

引用文献：

- (1) 松尾「圧縮性流体力学－内部流れの理論と解析」(理工学社)
- (2) D.S.Miller 「Internal Flow Systems (Second edition) Part1」 BHRA
Chapt.7 Compressible Flow 7.9.Valve
- (3) HTFS FM11 : Prediction of Noise Generated by Flow through a Let-down Valve
(HTFS HANDBOOK－1988)
- (4) ANSI/ISA S75.01-1985 Flow Equations for Sizing Control Valves
Instrument Society of America
- (5) “The Introduction of a Critical Flow Factor for Valve Sizing” by H.D.Baumann
ISA Transactions April 1