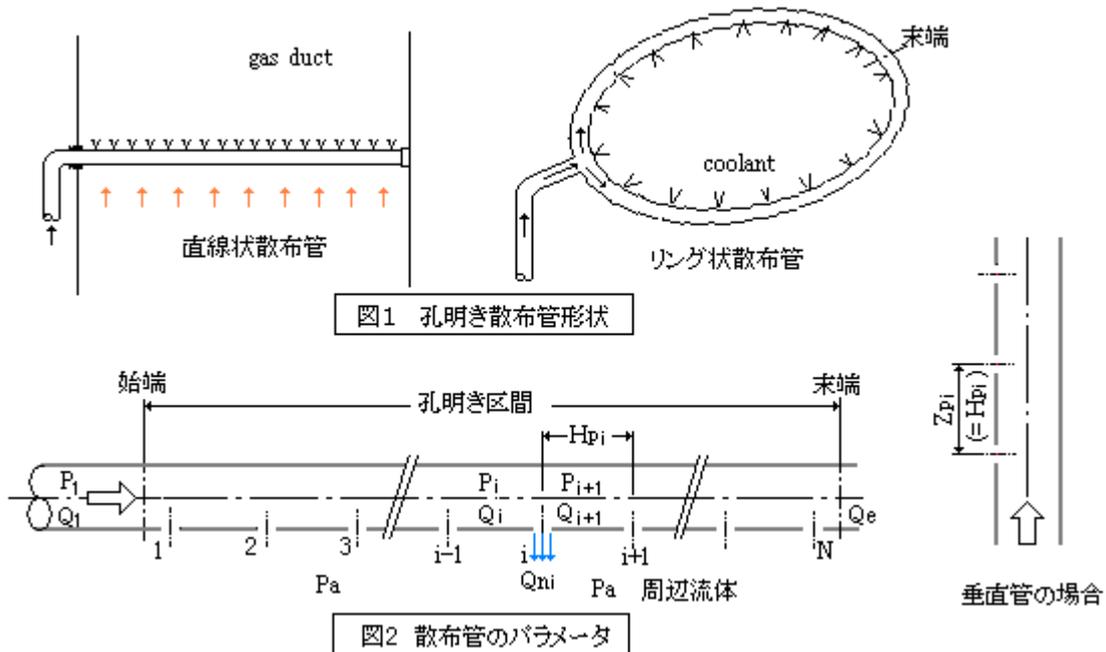


【整番】 FE-13-TM-001	【標題】 穴明き散布管の流量分布/元圧などの計算
分類：流れ(流量配分)/種別：技術メモ	作成年月：H19.7/改訂：Ver0.0 (H19.7) 作成者：N.Miyamoto

全 11 枚

通常、穴明き管はヘッダパイプに一定のピッチでキリ孔を開けて、薬液、消火水あるいは冷却水などを周辺に散布するものである。その設計では、所定流量を散布するための、あるいは均等に流体を散布するための孔のサイズ/個数/配列や必要元圧などを検討する必要がある。ここでは Blevins や Miller のテキストなど⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を base にして流量分布/元圧などの計算方法やこれに関連する情報を例示する。なおこの場合、

- ① 散布流体は液体、あるいは噴出し時を含めてマッハ数が 0.3 以下の気体とする。
- ② 流体は**全ての孔**を通して周辺に散布されるものとする。
- ③ 孔は無垢のキリ孔、即ち sharp-edge circular hole とする。



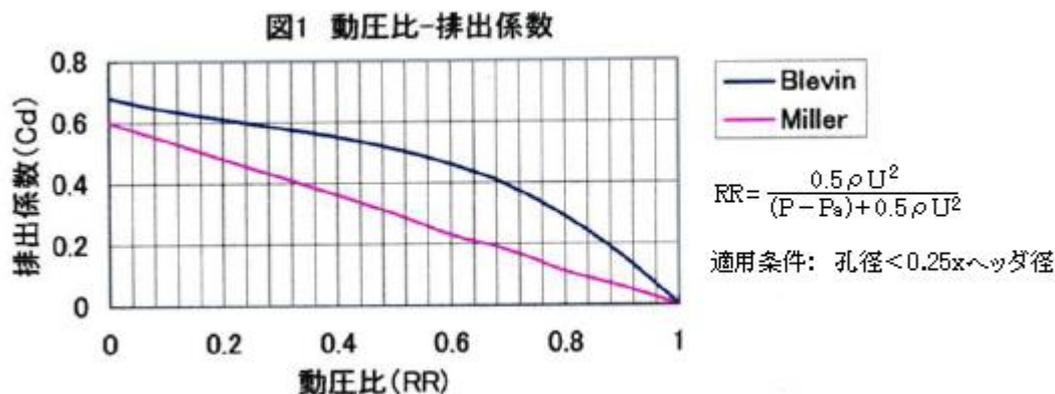
1. 流れ計算式 (図 2 参照)

- (1) 全散布流量： $Q_1 - Q_e = \sum Q_{ni}$ 【 均一散布のとき $Q_1 - Q_e = NQ_n$ 】 -----(1a),(1b)
- (2) 各孔の散布流量： $U_{ni} = C_{di} [2\{P_i - P_{ai} + 0.5(1 - k_n) \rho U_i^2 / \rho\}]^{0.5}$ または、
 $Q_{ni} = C_{di} A_{ni} [2\{P_i - P_{ai} + 0.5(1 - k_n) \rho Q_i^2 / A^2\} / \rho]^{0.5}$ -----(2a),(2b)
- (3) 孔前後の静圧変化： $P_i - P_{i+1} = -0.5 \rho (U_i^2 - U_{i+1}^2) + 0.5 k_n \rho U_i^2$
 $+ 0.5 (\lambda H_{pi} / d) \rho U_{i+1}^2 + \gamma_a Z$ -----(3)
- (4) 孔前後の連続保持： $U_i = U_{i+1} + U_{ni}$ または $Q_i = Q_{i+1} + Q_{ni}$ -----(4)
- (5) 孔明き区間の全圧損： $\Delta P = -0.5 \rho (U_1^2 - U_e^2) + 0.5 k_n \rho \sum U_i^2 + 0.5 \rho \sum (\lambda / d) U_{i+1}^2$ -----(5)

ここで Q =管内流量(m^3/s)、 Q_n =各孔の散布流量(m^3/s)、 Q_1 =始端管内流量(m^3/s)、 Q_e =末端管内流量(m^3/s)
 U =管内流速(m/s)、 U_n =各孔通過流速(m/s)、 U_1 =始端の管内流速(m/s)、 U_e =末端の管内流速(m/s)
 P =管内静圧(kg/m^2A)、 P_a =周辺静圧(kg/m^2A)、
 d =管の内径(m)、 d_n =孔径(m)、 A = 管断面積(m^2)、 A_n =孔断面積(m^2)、 N =孔数、 H_p =孔ピッチ
(m)、

Z_p =隣接孔レベル差(m)= H_p 、 λ =管摩擦損失係数(Moody 線図)、 C_d = 排出係数(図 1 に拠る)、
 k_n =流れが孔の上を通過する時の圧損係数(0.01)、 ρ =管内流体の密度 (kg/m^3)= γ/g 、

γ = 管内流体の比重量 (kg/m^3)、 γ_a = 周辺流体の比重量 (kg/m^3)、 g = 重力加速度 $\rightarrow (9.807\text{m/s}^2)$ 、
 サフィックス i \rightarrow “ i 番目の孔” の意、($i=1,2,3,\dots,N$)



2. 流れ計算手順(例)

(1) モデル化について。散布管の形状/様態は様々であるが、代表的には次の3つのパターンになる。

(a)水平直線状 (b)垂直直線状 (c)水平リング状

(a)と(b)はそのままモデル化する。(c)の場合は管内流量を半分に分けリング半周を対象モデルにする。
 その場合、始端はリング入口、終端は入口から 180° の位置、終端では管内流量ゼロとする。

(2) 計算手順について。一般の散布管では、別途の化工計算などから必要散布量が決まる場合が多いので、ここでは**散布流量が既知の場合**について、散布管始端圧力(元圧)を仮定して散布流量などの分布を求める手順をチャートにして例示する。このチャートの計算内容は次のようになっている。

[垂直/水平いずれの配置でも可]、[管内径は一定]、[孔径やピッチの変化も可]、
 [末端流量指定(管路中途に孔明き区間を設けるケースを配慮)]

計算手順は略々次の通り。

- ① まず第1ステップとして”均一散布”を前提に元圧の初期設定を行う。即ち始端圧力(=元圧)を仮定して一番目の孔の散布流量を求め、これが所定の単孔当たり散布流量とマッチするまで反復して、その元圧をもって初期値にする。
- ② 最初の孔から最終の孔まで、前述のように流れ計算式の(2)(3)(4)を連立して各孔の散布流量および孔前後の管内圧力/管内流量を計算する。
- ③ この過程で次のような不具合がでたら、元圧を加減して最終値に収束させる。
 - ①内外差圧不足で散布流量 < 0 になる時 \rightarrow 元圧が不足しているので設定元圧 P_1 を Up する。
 - ② N 番目の孔に到達するまでに管内流量 < 0 になる時 \rightarrow 元圧が過剰なので設定元圧を Down する。
 - ③最後の孔を通過した後、残った管内流量に過不足があるとき \rightarrow 設定元圧を Up/Down する。
 不具合が収束しない場合は孔仕様を変更し再試行する。

(3) 計算条件にはいろんなバリエーションがあるので、それに応じてチャートの内容を変えて運用する。

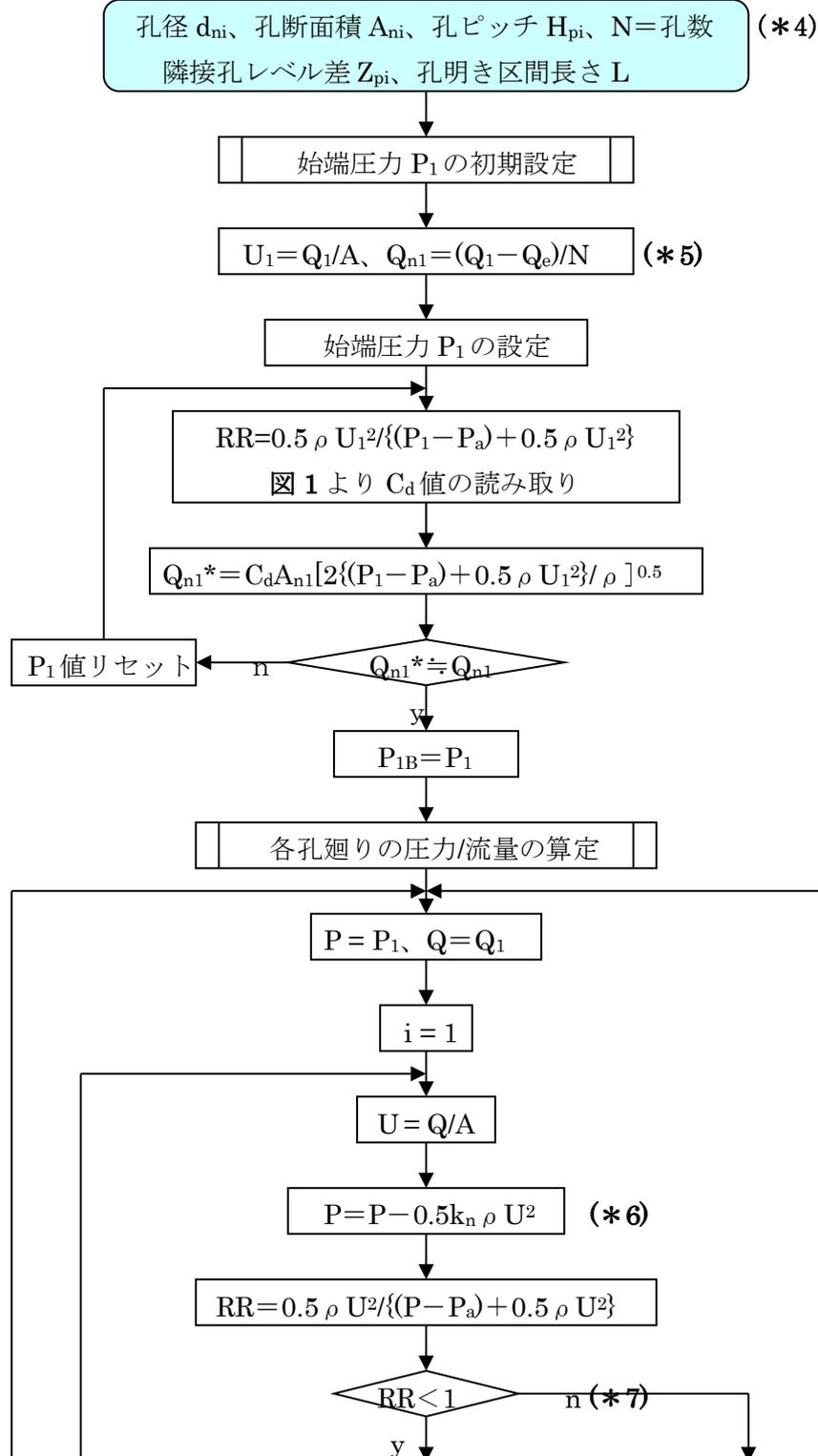
例えば、始端圧力が変えられないときは、逐次、各孔前後の流れ計算を行い、

散布流量ゼロ ($Q=Q_A$) & 管内流量ゼロ ($Q < 0$)

であれば直に、孔仕様(例えば孔数,孔径など)を変更する。

チャート1. 散布流量既知の場合の計算フロー(例)

始端流量 Q_1 、末端流量 Q_e 、基準周辺静圧 P_{a1} (*1)、圧力加減量 δP (*2)
 管内流体密度 ρ 、管内流体比重量 γ 、周辺流体比重量 γ_a (*3)
 管内径 d 、管断面積 A 、管摩擦損失係数 λ 、圧損係数 k_n



d = 孔明き管の内径(m)、 A = 孔明き管の断面積(m^2)、 L = 孔明き区間の長さ(m)、 d_n = 孔径、
 A_n = 孔断面積、 N = 孔数、 i = 孔番号(1... N)、 H_p = 孔ピッチ、 Z_p = 隣接孔レベル差(m) (= H_p) (*12)
 λ = 管摩擦損失係数、 k_n = 流れが孔の上を通過する時の圧損係数 (*13)、 C_d = 排出係数(図 1 参照)
 ρ = 管内流体の密度(kgs^2/m^4) = γ/g 、 γ = 管内流体の比重量(kg/m^3)、 γ_a = 周辺流体の比重量(kg/m^3)
 g = 重力加速度(m/s)
 サフィックス i → “ i 番目の孔” の意、($i=1,2,3,\dots,N$)

【 チャートの脚注 】

- (*1) 始端にある 1 番目の孔位置での周辺静圧。なお、周辺が気体の時あるいは散布管が水平の時はどの孔位置でも圧力 P_a は同じ。しかし垂直の散布管が水中にあって孔のレベルが変化する時はヘッド差による P_a の変化を考慮する必要あり。(*12)参照のこと。
- (*2) δP は始端の静圧を調整する際の反復計算で用いる。目安としては 10 kg/m^2 程度？。
- (*3) 周辺が気体の場合は、零としてよい。
- (*4) 個々の孔径や孔ピッチを設定できる(故に孔サイズを変えた孔明き管でも OK)。
- (*5) この場合、均一の散布流量を仮定している。
- (*6) 孔の直上では微小な圧損によって圧力が多少ダウンするという想定に拠っている。
- (*7) 圧力比 $RR=0.5 \rho U^2/\{(P-P_a)+0.5 \rho U^2\}$ は $P < P_a$ のとき 1 をオーバーし、周辺流体の吸い込みが起きる。このとき、ロジックでは $RR=1$ とし散布流量 $Q_n=0$ として扱う。
- (*8) 孔明き区間の中で $Q_A=Q$ になるのは、その部分以降で散布ゼロになることを意味する。これは元圧(始端圧力)が低いためであるから、元圧を U_p してみる。
- (*9) 孔明き区間の中で管内流量がゼロ以下になるのは、元圧が高すぎて散布が過剰になったためと思われる。元圧を $Down$ してみる。なお先行して $Q_A=Q$ であったなら、 P_1 は U_p されているので元圧 $Down$ は出来ない筈である。その場合は孔仕様などの変更を行う。
- (*10) 多分、孔径を小さく孔数を増やす方向ではないか？ 試行錯誤になる。
- (*11) 最終 N 番目の孔を通過した後の流量が所定流量 Q_e に漸近していないときは上記(*9)のやり方に倣って処理する。ただ数値的に処理が難しくなるので $Q_A=Q_e$ のマッチングを甘くする(?)
- (*12) 垂直管のとき指定し水平管ではゼロとする。流れが垂直上方に流れるとき+符号。下方の時-、また、その値は孔ピッチ H_p に同じ。
- (*13) 解説の 3. を参照のこと。ここでは 0.01 程度を推奨する。

3. 例題

内径 $\phi 100$ の先止まり穴明き管から約 $28.3t/hr(0.07856m^3/s)$ を散水してタンク設備を冷却し火災時の昇圧を防止する。この場合の必要元圧(始端にて)及び散布流量分布を計算されたし。なお

孔径 $\phi 15mm$ 、孔数 10、孔ピッチ 100mm、孔断面積 0.00017676 m^2 ---> 一定
 外気圧 10300 kg/m^2 、密度 $102 \text{ kgs}^2/m^4$ 、比重量 $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$

まず、 P_1 の初期設定を行なう。

$$U_1 = Q_1/A = 0.007856/0.007856 = 1 \text{ m/s}, Q_{n1} = (Q_1 - Q_e)/N = (0.007856 - 0)/10 = 0.0007856 \text{ m}^3/s$$

ここで、 $P_1 = 13150 \text{ kg/m}^2$ とすれば

$$RR = 0.5 \rho U_1^2 / \{(P_1 - P_a) + 0.5 \rho U_1^2\} = 0.5 \times 102 \times 0.007856^2 / (13150 - 10300 + 0.5 \times 102 \times 0.007856^2) = 0.0185387$$

Miller のデータを用いて $C_d=0.58881$ 、このとき

$$Q_{n1}^* = C_d A_{n1} [2\{(P_1 - P_a) + 0.5 \rho U_1^2\} / \rho]^{0.5}$$

$$= 0.58881 \times 0.00017676 \times \{2 \times (13150 - 10300 + 0.5 \times 102 \times 1^2) / 102\}^{0.5} = \mathbf{0.0007857} \text{ m}^3/\text{s}$$

ほぼ $Q_{n1} = Q_{n1}^*$ なので、初期値として $P_1 = 13150 \text{ kg/m}^2$ とする。このときの孔廻り計算の結果は、次のようになる。

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P	13150	13158.4	13166	13173	13179	13184	13189	13192	13194	13196
Q	0.00786	0.00707	0.0063	0.00549	0.0047	0.0039	0.00311	0.00231	0.00151	0.00071
Q_n	0.00079	0.00079	0.0008	0.00079	0.00079	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
P_A	13158.4	13166	13173	13179	13184	13189	13192	13194	13196	13196
Q_A	0.00707	0.00628	0.0055	0.0047	0.0039	0.0031	0.0023	0.00151	0.00071	-9E-5

散布流量は殆ど一定、静圧 P は多少上昇傾向である。どの位置でも $P > P_a$ で問題はないが、最終 10 番目のアフター流量 Q_A が少しマイナスになっているので、 P_1 を少し下げて計算してみると、 $P_1 = 13015 \text{ kg/m}^2$ で下記のようにプラスに転じる。従って $P_1 = 13015 \sim 13150 \text{ kg/m}^2$ で均衡している。散布流量分布は殆どフラット(均一)である。

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P	13015	13023	13031	13037	13043	13048	13053	13056	13059	13060
Q	0.00786	0.00709	0.0063	0.00555	0.00478	0.004	0.00322	0.00244	0.00167	0.00089
Q_n	0.00077	0.00077	0.00077	0.00077	0.00078	0.0008	0.00078	0.00078	0.00078	0.00078
P_A	13023	13031	13037	13043	13048	13053	13056	13059	13060	13061
Q_A	0.00709	0.00632	0.00555	0.00478	0.004	0.0032	0.00244	0.00167	0.00089	0.00011

【 解 説 】

0. 孔明き散布管は、パイプに多数のピッチ孔を明けて内部流体を周辺に散布するもので、構造が至ってシンプルなので、いろんな産業分野で、冷却水/消火水/添加材/薬液などの散布によく使われている。

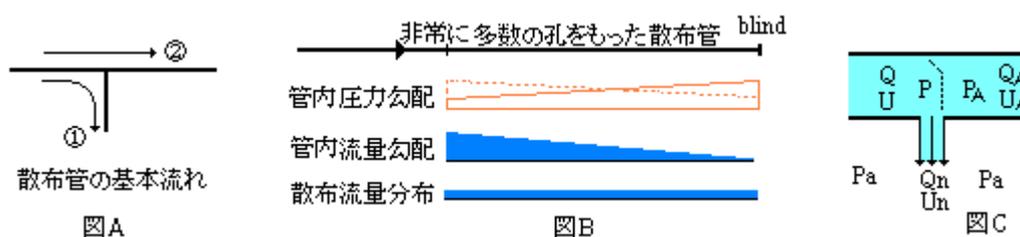
機能的には一定流量を周辺にばら撒けばよいといったラフなものもあるが、総じて**各孔からの散布量が一樣**で、かつ**全ての孔から万遍に散布できる**ようにしている。本 TS でもこの機能性を前提にして記述している。

1. 孔明き散布管の流れは、**ティの分岐流れの一種**とみなせば理解し易い。流体は、孔通過に際して

①管から周辺に分岐する流れ & ②そのまま管内をパスする流れ

に分かれる。①の**分岐流れ**は管内外の差圧によって流れ、分岐流量は差圧の程度と孔通過の時の流れ抵抗に依存している。通常、孔サイズ/本数/ピッチをよく選べば分岐量は均一に近づく。

②の**パス流れ**では分岐流れの多寡に応じて流れ方向に流量が減少し、摩擦損失の多寡によって圧力が増加したり減少したりする。総じて管内流れの孔通過に際しての急激な変化はなく、累積して全体に流れ方向に緩慢な勾配となる。



2. ①の外部(周辺)に分岐流れには次の関係がある。図 C 参照。

$$P + 0.5 \rho U^2 = P_a + 0.5 k \rho U_n^2$$

これを変形すれば、

$$U_n = (1/k)^{0.5} [2\{(P - P_a) + 0.5 \rho U^2\} / \rho]^{0.5}$$

$C_d = (1/k)^{0.5}$ とすれば

$$U_n = C_d [2\{(P - P_a) + 0.5 \rho U^2\} / \rho]^{0.5} \quad \text{----- (a)}$$

$$\text{あるいは } Q_n = C_d A_n [2\{(P - P_a) + 0.5 \rho U^2\} / \rho]^{0.5} \quad \text{----- (b)}$$

(a)式は Blevins のテキストの式である⁽¹⁾。この式を下記のヘッドで表現したのが Miller の式である⁽²⁾。

$$Q_n = C_d A_n [2g(h - h_a + U^2/2g)]^{0.5} \quad \text{----- (c)}$$

(b)式と(c)式は全くおなじである。然るに**排出係数 C_d の値が違っている**。排出係数は全圧損係数の逆数の自乗で、孔通過流れの圧損係数によってきまる。この圧損係数はティ分岐のそれ⁽⁴⁾と同じように流量配分の影響を受けるので、両者(特に Miller データ)は分岐流れの圧損データを斟酌していると思われる。この場合、 C_d 値を求めるパラメータは、

$$\text{Blevins : } RR = 0.5 \rho U^2 / \{(P - P_a) + 0.5 \rho U^2\}$$

$$\text{Miller : } E = (U^2/2g) / \{(h - h_a) + (U^2/2g)\}$$

これらは実質同一であるから、次の表のようにストレートに比較できる。この表から Blevins の C_d 値の方が高くなっており、両者に有意差がある。

RR(E)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Blevins	0.68	0.64	0.61	0.58	0.55	0.51	0.46	0.39	0.29	0.16	0
Miller	0.60	0.54	0.48	0.42	0.36	0.30	0.23	0.18	0.11	0.06	0

(注記) 0.6 以上の Miller のデータは外挿して推定したもの。

おそらくこの差は、データの条件が違うためだと思われる。即ち

Blevins → 管肉厚 $t <$ 孔径 d_n

Miller → 管肉厚 $t <$ 0.5 x 孔径 d_n

孔通過流れには再付着の問題があり排出係数 C_d は当然、 t/d_b によって変化する。ただこの領域ではかなり変曲するので、孔通過流れの再付着も含めてもっと検討する必要がある。ここでは暫定的に次の方便を提案しておく。

$t <$ 0.5 d_n ----- Miller のデータに拠る

0.5 $d_n <$ $t <$ d_n ----- Blevins のデータに拠る

因みに上記の C_d 値の条件付けは次のようになっている。特例的な孔仕様のときに参考になるかと思う。

	Blevins	Miller
孔径－ヘッダ径	孔径 < 0.25x 管径であること。	孔径 < 0.25x 管径であること。
肉厚－孔径	肉厚 < 孔径であること。	肉厚 < 孔径であること。もし肉厚 > 孔径ならば $C_d = 1.2x$ データ値
孔の形状	孔角を丸めるなら $C_d = 1.2 \sim 1.5x$ データ値	-----

3. ②のパス流れでは次のような関係が成立する。

$$P - P_A = -0.5 \rho (U^2 - U_A^2) + 0.5 k_n \rho U^2 + 0.5 (\lambda H_p / d) \rho U_A^2 + \gamma Z_p \text{ ----- (d)}$$

なお 水平管のときは $Z_p = 0$ である。

i 番目の孔前後では次のように (a) 式と (d) 式と連続の式を連立させることで流れ関係が記述できる。但し

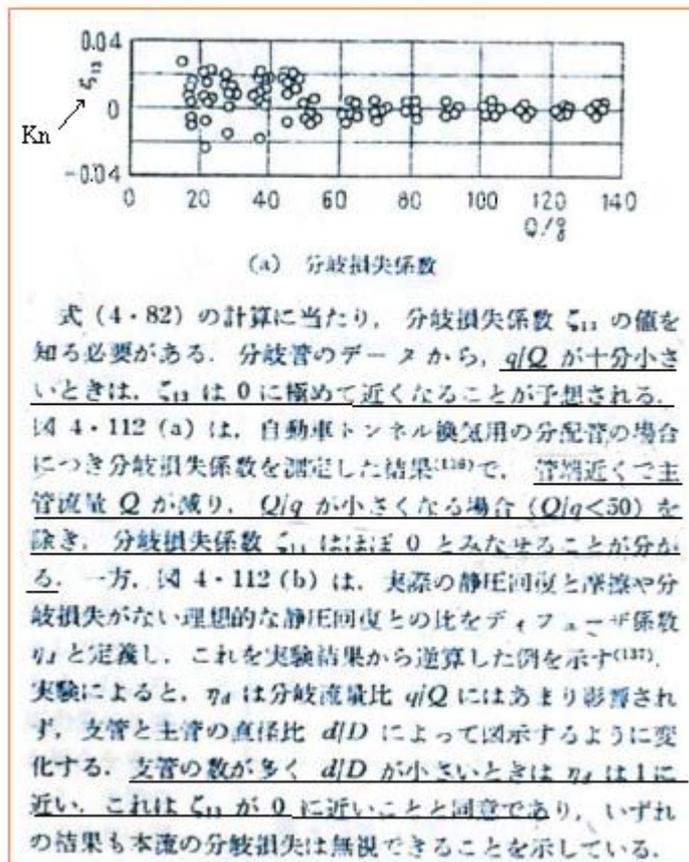
$$P = P_i, P_A = P_{i+1}, P_a = P_{ai}, U = U_i, U_A = U_{i+1}$$

と一般表示に置き換える。

- $U_{ni} = C_{di} [2\{(P_i - 0.5 k_n \rho U_i^2 - P_{ai}) + 0.5 \rho U_i^2\} / \rho]^{0.5}$
- $P_i - P_{i+1} = -0.5 \rho \{U_i^2 - U_{i+1}^2\} + 0.5 k_n \rho U_i^2 + 0.5 (\lambda H_{pi} / d) \rho U_{i+1}^2 + \gamma Z_{Pi}$
- $U_i = U_{i+1} + U_{ni}$

計算チャートでは、 $i = 1 \rightarrow N$ の各孔前後についてこの連立式を逐次解いてゆくことで、圧力分布/流量分布を計算している。煩雑になるので詳しい説明は割愛するが、ロジックは単純なのでチャートで読み取れると思う。

なお、(d) 式における圧損係数 k_n について多少説明しておく。これはパス流れが孔の面上を通過する時の圧損係数である。これについては文献(3)に次のような記述がある。



この文献では無視できるとしているが、不安が残るので、本 TS では $k_n=0.01$ を採るものとする。

4. 計算チャートについて、簡単に説明しておく。この計算はトータルの散布流量が予め決められている時、孔仕様の適正を調べ、管の始端圧力(元圧) P_1 を求め散布流量などの分布を計算するものである。孔仕様(孔径/孔数/孔ピッチあるいはスプレーノズルの適用)のシミュレーションもできる筈である。なお、計算の前提としては、「散布が途中で停止することなく最後の孔まで散布可能」とする。

まず、第1ステップとしては、「均一散布」を仮定して元圧の初期設定を行う。即ち一番目の孔において管内圧(=元圧)を仮定して散布流量を計算しこれが所定の散布流量/孔とマッチするまで繰り返して元圧を収束させ、これを元圧の初期値にする。通常、孔径が小さく孔数が多いと各孔均一な散布流量に漸近するので、余程無理な孔仕様でない限り、この初期値は最終値から大きく逸脱しないと思われる。

次に各孔廻りについて前述のように(a)式、(d)式、連続の式を連立して各流量/圧力を計算する。この際次の不具合があったら、元圧を加減して収束させる。

- ① 内外差圧不足で散布流量 <0 になるとき→元圧が不足しているので設定元圧 P_0 を Up
 - ② 最終 N 番目の孔に到達するまでに管内流量 <0 になるとき→元圧が過剰なので設定元圧 P_0 を Down
 - ③ 最後の孔通過後、流量が所定流量にならないとき→元圧に過不足があるのでこれを Up/Down
- いずれの措置でも不具合が収束しない場合は孔仕様を変更する。

以上で、基本的な散布管のシミュレーションは可能である。基本パターンから逸脱する場合はこれをベースにしてロジックを洗いなおせばよい。

5. 孔明き散布管は分配マニホールド(分配ヘッダ)の一種である。ここで付帯的な情報として、分配マニホールドに及ぼす摩擦損失の影響について多少触れておく。

マニホールドの軸方向流れに関しては、孔数が非常に多く孔の配列が等間隔で各孔からの噴出流量が同じ場合、Blevins のテキストでは、以下のようにこれを連続して変化する流れとして扱っている。

(d)式を水平管に適用して($Z_p=0$)、微分方程式で表現すると、

$$dP/dx = -(1/2) \rho dU^2/dx + (1/2) \rho U^2 \lambda / D$$

ここで x はマニホールド端から上流任意位置までの距離を表わす。一様噴出であれば、流速分布 U はほぼ線形になるので、

$$U = U_L(A_L/A)X/L \quad (\text{但し } U_L, A_L \text{ はマニホールド入口の流速と断面積})$$

これを前式に代入して

$$dP/dx = (1/2) \rho (U_L A_L / A)^2 \{2x^2 / (AL^2)\} dA/dx - 2x/L^2 + (\lambda / D)(x^2/L^2)$$

$A \propto D^2$ であるから

$$dP/dx = (1/2) \rho (U_L A_L / A)^2 \{4x^2 / (DL^2)\} dD/dx - 2x/L^2 + (\lambda / D)(x^2/L^2)$$

$D = \text{const}$ 、高レイノルズ数で $\lambda = \text{ほぼ const}$ として

$$dP/dx = (1/2) \rho U_L^2 (A_L / A)^2 \{-2x/L^2 + (\lambda / D)x^2/L^2\} \text{------(e)}$$

この変数分離タイプの方程式を解いて

$$P = P_L - (1/2) \rho U_L^2 [x^2/L^2 - 1 + \{\lambda L / (3D)\}(1 - x^3/L^3)]$$

層流の場合は摩擦係数 λ はレイノルズ数に反比例するので

$$P = P_L - (1/2) \rho U_L^2 \{[\lambda_L L / (2D)] - 1\} (1 - x^2/L^2) \quad (\text{但し } \lambda_L = \text{層流の摩擦係数})$$

(この式は Blevins テキストのままとした。導入過程が不明確?)

(e)(f)式では摩擦損失 $[\lambda L/D]$ の大きさによって、静圧がマニホールド流れ方向に沿って上昇したり下降したりする。即ち

長いマニホールドで $\lambda L/D > 1$ (高摩擦損失) → 流れ方向に静圧は減少

短いマニホールドで $\lambda L/D < 1$ (低摩擦損失) → 流れ方向に静圧は増加(管末端で最大圧力に)

[この判別の論拠については、末尾の脚注を参照のこと。]

6. 更に、分配マニホールドにおいて均一な流量配分を達成するために、Blevins は以下のように推奨している。この考えは孔明き散布管にも適用できる。なおここで分岐管は定圧リザーバに連結しているとする。

<p>アプローチ 1</p>	<p>主管が定圧のリザーバ(受槽)として機能するように主管の断面積を大きくする。然らば主管の流速減少や摩擦損失による圧力降下は小さい(内外差圧の変化が少なく一定の分岐流量が保てる)。</p> <p>層流($U_L D_L / \nu < 2000$) : $2.8(A/A_b)^2 \gg 1$、$5.0\{D/(f_L L)\}(A/A_b)^2 \gg 1$</p> <p>乱流($U_L D_L / \nu < 4000$) : $2.8(A/A_b)^2 \gg 1$、$7.7\{D/(f_L L)\}(A/A_b)^2 \gg 1$</p>
<p>アプローチ 2</p>	<p>流れ方向に沿って一様な静圧を維持するように主管断面積の輪郭をとる(テーパ管)。</p> <p>層流($U_L D_L / \nu < 2000$) : $A/A_L = (x/L)^\alpha$ <但し $\alpha = 1 - f_L L / 4D_L$></p> <p>乱流($U_L D_L / \nu < 4000$) : $A/A_L = [(1 + f_L / D_L)(x/L)^{1/2} - (f_L / 2D)(x/L)]^2$</p>
<p>アプローチ 3</p>	<p>主管内の圧力変化の如何によらず同じ分岐流量を流せるように各分岐のノズルの長さや径を変える。</p> <p>層流($U_L D_L / \nu < 2000$) : 主管静圧 $p = p_L - (\rho U_L^2 / 2)(f_L L / 2D - 1)(1 - x^2/L^2)$</p> <p>乱流($U_L D_L / \nu < 4000$) : 主管静圧 $p = p_L - (\rho U_L^2 / 2)[x^2/L^2 - 1 + (f_L L / 3D)(1 - x^3/L^3)]$</p>

表中の記号の定義

U=流速、p=静圧(A)、D=主管径(or 水力径)、A=主管断面積、A_b=分岐管断面積の合計
 L=主管長さ、x=末端からの距離 f =完全乱流域の管摩擦係数(長さ方向でほぼ一定)、
 f_L=層流域の管摩擦係数=64/(U_LD_L/ν)、ν=動粘度、
 サフィックスL → “マニホールド始端(x=L)” の意、

[脚注] (e)式の $dP/dx=(1/2) \rho U_L^2(A_L/A)^2\{-2x/L^2+(\lambda/D)x^2/L^2\}$ を考える。この式は函数 P(x)即ち

$$P=f(1/2) \rho U_L^2(A_L/A)^2\{-2x/L^2+(\lambda/D)x^2/L^2\}dx$$

の $x=L \rightarrow 0$ の圧力勾配を示す。dx<0 なので、方便上、次のように符号を変え、変形すると

$$\begin{aligned} dP/dx &= -(1/2) \rho U_L^2(A_L/A)^2\{-2x/L^2+(\lambda/D)x^2/L^2\} \\ &= (1/2) \rho U_L^2(A_L/AL)^2\{2x-(\lambda/D)x^2\} \end{aligned}$$

これをもう 1 回微分すると

$$\begin{aligned} d^2P/dx^2 &= \rho U_L^2(A_L/AL)^2\{1-(\lambda/D)x\} = \rho U_L^2(A_L/AL)^2\{1-(\lambda L/D)(x/L)\} = \rho U_L^2(A_L/AL)^2G(y) \\ &\text{但し } G(y) = \{1-(\lambda L/D)y\}, y=x/L \end{aligned}$$

y ≤ 1 なので (λL/D) ≤ 1 のとき 常に G(y) > 0 即ち d²P/dx² > 0 である。この時、函数 P(x) は下図のように上向き凹で 0 < x < L の範囲で dp/dx > 0 となる。

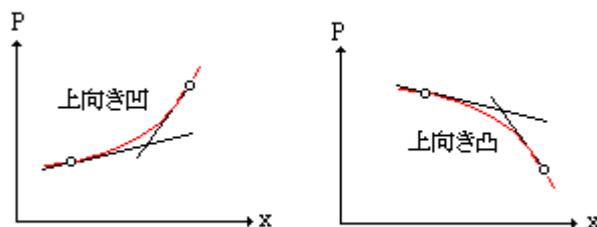
一方、(λL/D) > 1 のとき 0 < y < D/(λL) のとき G(y) > 0、D/(λL) < y < 1 となり函数 P(x) は前者で上向き凹で dp/dx > 0、後者で上向きと凸で dp/dx < 0 になる。そして(λL/D)が 1 を大きくオーバーすれば、殆ど dp/dx < 0 になる。従って

短いマニホールドで λL/D > 1 (低摩擦損失) → 流れ方向に静圧は増加(管末端で最大圧力に)

長いマニホールドで λL/D > 1 (高摩擦損失) → 流れ方向に静圧は減少に転じる

ことになる。この傾向はよく知られている。

以上、N.M 記



引用文献：

- (1) R.D. Blevins 「Applied Fluid Dynamics Handbook」 (Von Nostrand Reinhold Co)
6. Jointing and dividing flow
- (2) D.S. Miller 「Internal flow systems」 (BHRA)、13.12.2 Discharge from a pipe
- (3) JSME 技術資料「管路ダクトの流れ抵抗」4.9 分配管
- (4) 【FE-14-RP-006 分岐管の圧損係数計算(Blevin ベース)】