

【整番】FE-13-TM-005	【標題】分配管・集合管の流量配分計算法
分類：流れ(流量配分)／種別：設計メモ	作成年月：H21.9／改訂：Ver0.1(21.9)
	作成者：N.Miyamoto

追加補足及び誤記訂正

全 22 枚

0. 「単一なヘッダから複数の分岐ラインに流量を分配する」 and/or 「複数の分岐ラインから単一なヘッダに流量を集合させる」システムはプラント設備の中で頻繁に登場する。そのとき常に問題になるのは、流量の配分不良である。これについては、

[FE-13-TM-003 流量分配・集合システムに関する情報(单相流の場合)]

[FE-13-TM-004 流量分配・集合システムに関する情報(気液二相流の場合)]

で、その傾向と対策について知見を集約した。ただこれらは定性的情報に拠るもので定量的な裏付けを欠いている。然るに、実際のエンジニアリングの場合では、当該システムの流量配分計算とその結果が要求されることも多い。

昨今はコンピュータによるネットワーク(管路網)計算が普及して、この種の計算は殆ど労力を要せず実施できる。しかしコンピュータソフトのランには少なからず熟練がいる。また、然るべきソフトが手元にない場合もある。

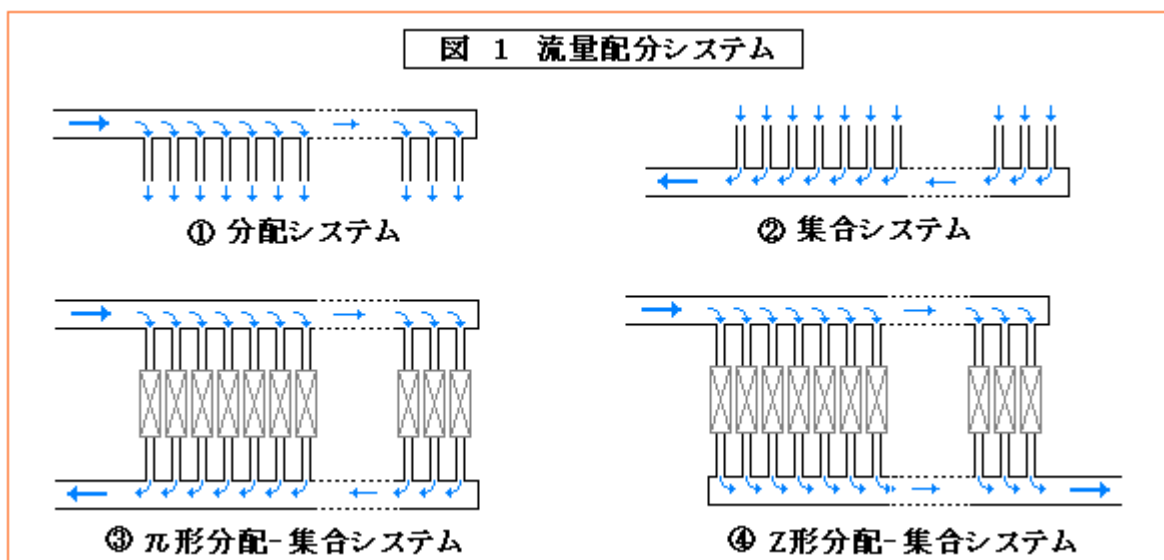
本 TS は、既存テキストにある单相非圧縮性流れの流量配分計算法をフローチャート化したもので、Excel などでも扱える。また内容的にも汎用管路網計算ソフトと同等程度の結果は期待できると思う。

ここで示す流量配分計算法は次の3つである。

- ① [分配管 or 集合管]システムの流量配分計算法一分岐ピッチが長い場合<sup>(1)</sup>
- ② [分配管システム]の流量配分計算法一分岐ピッチが短い場合<sup>(2)</sup>
- ③ [分配管+集合管]システムの流量配分計算法一分岐ピッチが長い場合

①,③では、システムを通過する全流量と圧損係数から流量の分配率を計算し各分岐流量を求める。システムの入口圧力は直接得られないが、流量配分計算の結果を用いて副次的に計算できる。

②では全流量/出口圧力に対してシステム入口圧力を仮定して各分岐流量を計算する。①③とは少しアプローチが異なっている。

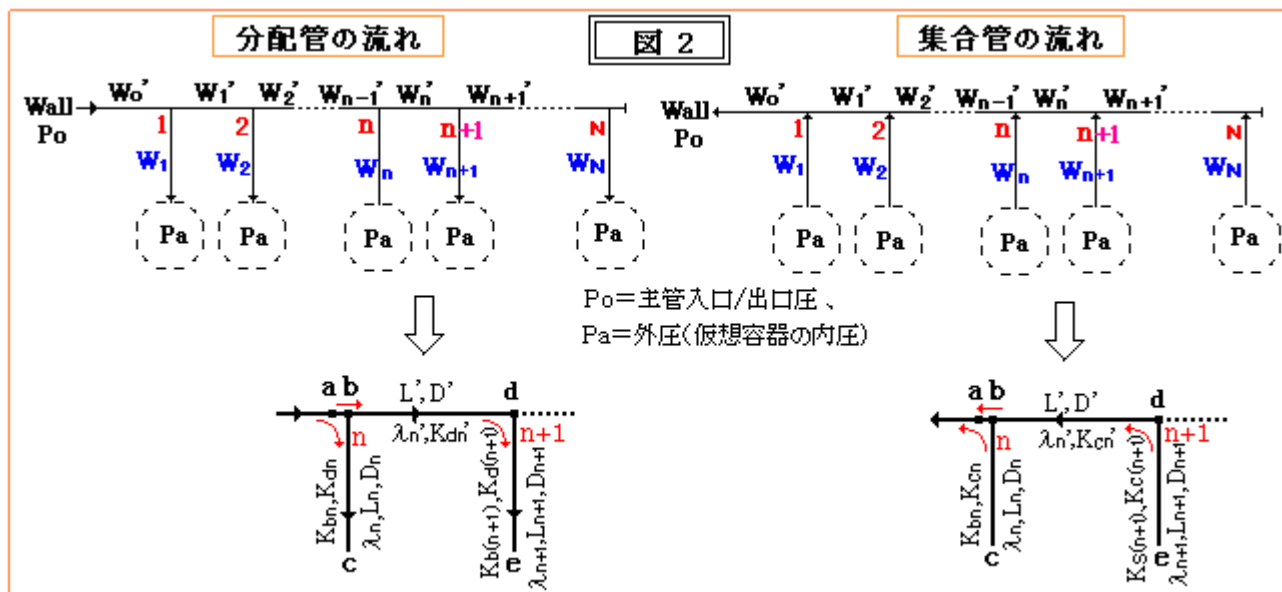


1. [分配管 or 集合管]システムの流量配分計算法—分岐ピッチが長い場合

本計算法は JSME 技術資料<sup>(1)</sup>のⅢ編管路ダクト系の計画・設計例の A.7「給水の分岐配管」および 4.8「ガス捕集配管」に記載されるもので、ここではプログラム化のため、チャートの形にして示す。

対象モデルを図 2 に示す。単相非圧縮性流れであって、各分岐管の端は圧力一定の容器(定圧のタンクとみなされる圧力源)につながっているものとする。分配管は、ヘッダー(主管)から分岐管を介して各容器に流れを分配する。集合管は、各容器から分岐管を介してマニホールドの主管に流れを集合させる。なお主管は均一径で水平置き、各分岐端のレベル(高さ)はすべて同じとする。

分配管も集合管も、定常流れでは流れ方向が異なるだけで、各部分の流量分布は同じである(下図でも流れ方向のみ変え流量は同じにしている)。従って分配管も集合管も全く同じ手順で扱える。ただ、流れ方向の違いによって分岐ティの圧損係数がかなり違ってくる。



まず分配管の流れについて。分岐ライン n, n+1 の流れをみると、

- ① 経路 a-b-c & ② 経路 a-b-d-e

は、始端 a が共通であって終端 c, e が静圧 Pa の容器に接続されるので、その静圧降下量は等しくなる。

$$\Delta P_n = \Delta P_n' + \Delta P_{n+1} \quad \text{-----詳しくは末尾の補足説明による。}$$

$$\Delta P_n = K_n \times 0.5 \rho U_n^2 = K_n \times 0.5 \rho \{W_n / (\rho S_n)\}^2$$

$$\Delta P_n' = K_n' \times 0.5 \rho U_n'^2 = K_n' \times 0.5 \rho \{W_n' / (\rho S')\}^2$$

$$\Delta P_{n+1} = K_{n+1} \times 0.5 \rho U_{n+1}^2 = K_{n+1} \times 0.5 \rho \{W_{n+1} / (\rho S_{n+1})\}^2$$

よって  $K_n (W_n / S_n)^2 = K_n' (W_n' / S')^2 + K_{n+1} (W_{n+1} / S_{n+1})^2$  (但し  $S_n, S'$  は分岐管, 主管の流路断面積)

この式において、質量流量  $W_n, W_n', W_{n+1}$  は次のようになる。

$$W_n = f_n W_{n-1}' = f_n F_{n-1} W_0', \quad W_{n+1} = f_{n+1} W_n' = f_{n+1} F_n W_0'$$

$$W_n' = W_n / f_n - W_n = \{(1 - f_n) / f_n\} W_n = \{(1 - f_n) F_{n-1}\} W_0' = F_n W_0'$$

ここで、 $f$  = 分流量 [= 分岐流量 / (分岐前の主流量)]、 $W_0'$  = 全流量 (=  $W_{all}$ )

$F$  = 主流率 [= (分岐後の主流量) / (分岐前の主流量)] の累乗積

$$\text{例えば、} F_n = (1 - f_1)(1 - f_2)(1 - f_3) \dots (1 - f_{n-1})(1 - f_n)$$

前式にこれらの関係を用い、分流量  $f_n$  について解くと次の式が得られる。

$$f_n = 1 / [1 + [K_n / \{(S_n/S')^2 K_n' + f_{n+1}^2 K_{n+1}\}]^{0.5}] \text{ -----(d1)}$$

なお、圧損係数  $K_n, K_n', K_{n+1}$  は次のようになる。

$$K_n = C_{rn} K_{dn} + \lambda_n (L_n/D_n) + K_{bn}, \quad K_{n+1} = C_{r(n+1)} K_{d(n+1)} + \lambda_{n+1} (L_{n+1}/D_{n+1}) + K_{b(n+1)}$$

$$K_n' = C_{rn}' K_{dn}' + \lambda_n' (L_n'/D')$$

ここで  $K_d$  = 主管-分岐管流れのティ圧損係数、 $K_d'$  = 主管-主管流れのティ圧損係数、

$C_r$  = 分岐管の粗さ補正係数(-)、 $C_r'$  = 主管の粗さ補正係数(-)

$K_b$  = 分岐管フィティング類の合計圧損係数、 $\lambda$  = 分岐管の管摩擦損失係数、

$\lambda'$  = マニホールド主管の摩擦損失係数、 $L$  = 分岐管相当長さ、 $L'$  = マニホールド分岐ピッチ

$D$  = 分岐管内径、 $D'$  = マニホールド主管内径、サフィックス  $n \rightarrow$  分岐番号 (1, 2, 3, ... N)

次に、**集合管の流れ**について。流れ方向は異なるものの、圧損関係は分配管流れに同じである。即ち

$$\Delta P_n = \Delta P_n' + \Delta P_{n+1} \rightarrow K_n x (W_n/S_n)^2 = K_n' x (W_n'/S')^2 + K_{n+1} x (W_{n+1}/S_{n+1})^2$$

合流率を、[=分岐側からの流量/集合後の主流量]とすれば、流量  $W_n, W_n', W_{n+1}$  と合流率  $f_n$  は、

分配流れの場合と全く同じ式になる。即ち

$$W_n = f_n W_{n-1}' = f_n F_{n-1} W_0', \quad W_{n+1} = f_{n+1} W_n' = f_{n+1} F_n W_0'$$

$$W_n' = W_n / f_n - W_n = \{(1 - f_n) / f_n\} W_n = \{(1 - f_n) F_{n-1} W_0'\} = F_n W_0'$$

$$f_n = 1 / [1 + [K_n / \{(D/D')^4 K_n' + f_{n+1}^2 K_{n+1}\}]^{0.5}]$$

なお、各部の圧損係数は、次のようになる。

$$K_n = C_{rn} K_{cn} + \lambda_n (L_n/D_n) + K_{bn}, \quad K_{n+1} = C_{r(n+1)} K_{c(n+1)} + \lambda_{n+1} (L_{n+1}/D_{n+1}) + K_{b(n+1)}$$

$$K_n' = C_{rn}' K_{cn}' + \lambda_n' (L_n'/D')$$

$K_c, K_c'$  は、分配管の  $K_d, K_d'$  に相当する。

ティ圧損係数  $K_d, K_d', K_c, K_c'$  については下記の通り(なお末尾の補足説明を参照されたし)。

#### 層流( $Re < 2000$ )の場合のティ圧損係数

$$\text{分配管: } K_{dn} = \{(7000 - Re_n) / Re_n\} (S_n/S')^2 (W_{n-1}'/W_n)^2 + 1 \quad [\text{但し } Re_n = 4W_n / (\pi D_n \mu)]$$

$$K_{d(n+1)} = \{(7000 - Re_{(n+1)}) / Re_{(n+1)}\} (S_{n+1}/S')^2 (W_n'/W_{n+1})^2 + 1 \quad [\text{但し } Re_{(n+1)} = 4W_{n+1} / (\pi D_{n+1} \mu)]$$

$$K_{dn}' = \{(3650 - Re_n') / Re_n'\} (W_{n-1}'/W_n')^2 + 1 \quad [\text{但し } Re_n' = 4W_n' / (\pi D' \mu)]$$

$$\text{集合管: } K_{cn} = \{(7300 + Re_n) / Re_n\} (S_n/S')^2 (W_{n-1}'/W_n)^2 - 1$$

$$K_{c(n+1)} = \{(7300 + Re_{(n+1)}) / Re_{(n+1)}\} (S_{n+1}/S')^2 (W_n'/W_{n+1})^2 - 1$$

$$K_{cn}' = \{(2100 + Re_n') / Re_n'\} (W_{n-1}'/W_n')^2 - 1$$

#### 乱流( $Re > 2000$ )の場合のティ圧損係数(Vaszonyi の式)

$$\text{分配管: } K_{dn} = 2.25 - 0.46 (W_{n-1}'/W_n) (S_n/S'),$$

$$K_{d(n+1)} = 2.25 - 0.46 (W_n'/W_{n+1}) (S_{n+1}/S'),$$

$$K_{dn}' = 1.7 - 0.9 (W_{n-1}'/W_n') - 0.8 (W_{n-1}'/W_n')^2$$

$$\text{集合管: } K_{cn} = 2.5 (W_{n-1}'/W_n) (S_n/S') \{(W_{n-1}'/W_n) (S_n/S') - 0.205 (W_n/W_{n-1}') - (S_n/S') (W_n'/W_n)^2\} - 0.5$$

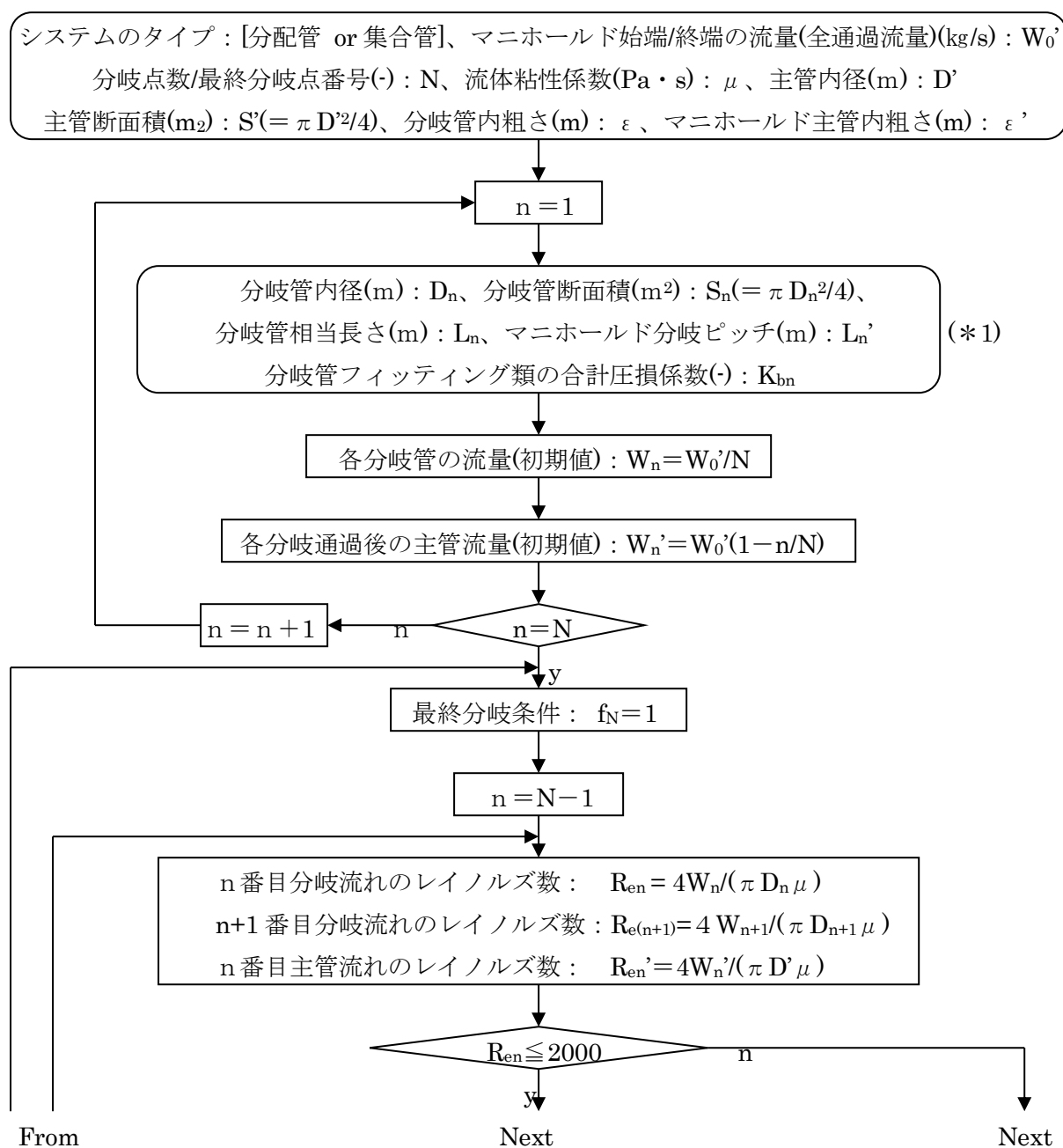
$$K_{c(n+1)} = 2.5 (W_n'/W_{n+1}) (S_{n+1}/S') \{(W_n'/W_{n+1}) (S_{n+1}/S') - 0.205 (W_{n+1}/W_n') - (S_{n+1}/S') (W_{n+1}'/W_{n+1})^2\} - 0.5$$

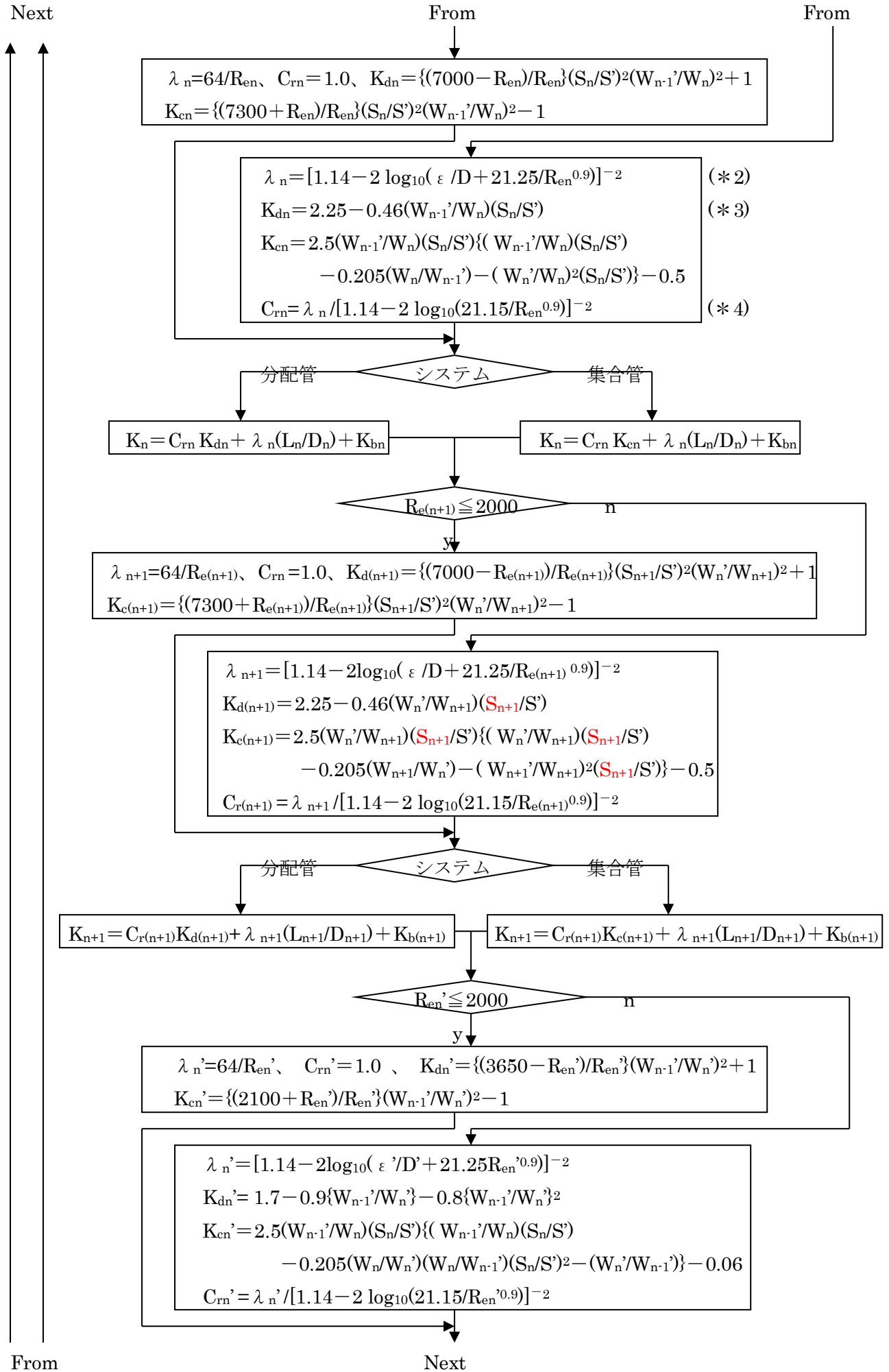
$$K_{cn}' = 2.5 (W_{n-1}'/W_n') \{(W_{n-1}'/W_n') - 0.205 (S'/S_n) (W_n/W_n') (W_n/W_{n-1}') - (W_n'/W_{n-1}')\} - 0.06$$

計算ステップは以下ようになる。計算手順をチャート 1 に示す。

- ステップ 1: 入力データを準備し、各部の初期流量を設定する。初期流量は、均等に各分岐管に分配/集合されるものとして設定する。
- ステップ 2: 各分岐管の分流率/合流率を計算するため、個別の摩擦損失係数/圧損係数を計算し分岐管流れの圧損係数  $K_n, K_{n+1}$  と主管流れの  $K_n'$  を求める。
- ステップ 3: 上記で求めた圧損係数を用いて、分配管の分流率(分配ケース)あるいは集合管の合流率を計算する。
- ステップ 4: 以上の分流率/合流率を用いて各分岐管の流量と主管各部の流量を計算する。更にこの結果を初期設定値と比較して略々合致するまで、ステップ 2~4 を繰り返す。なお 2 回目以降の各部の設定流量としては、その前の計算結果をそのまま用いる。

チャート 1: 分配管/集合管の流量配分計算手順





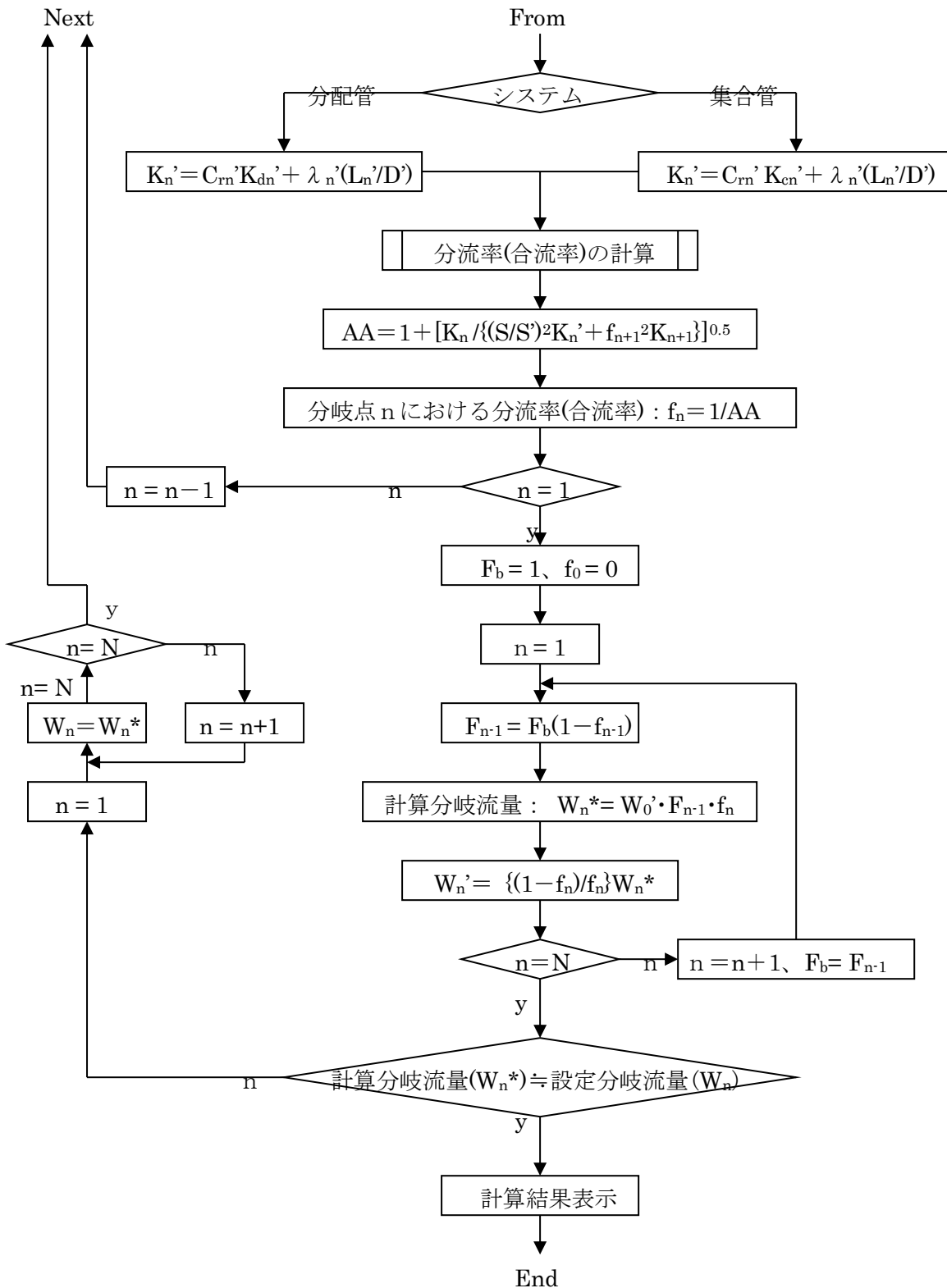


チャート 1 記載の記号説明：

$W_0'$  = マニホールド始端/終端の流量(全通過流量) (kg/s) → 図 2 参照のこと。

$W$  = 分岐流量(kg/s)、 $W'$  = 主管通過流量(kg/s)、

$N$  = 分岐点(分岐管)数ないし最終分岐点(分岐管)番号、 $n$  = 分岐管(分岐点)番号 = 1, 2, 3, ……  $N$

$D$  = 分岐管内径(m)、 $D'$  = マニホールドの主管内径(m)、

$L'$  = マニホールドの分岐ピッチ(m)、 $L$  = 分岐管の相当長さ(m)

$K_d$  = 分配管の主管-分岐管流れのティ圧損係数(-)、 $K_d'$  = 分配管の主管-主管流れのティ圧損係数(-)  
 $K_c$  = 集合管の分岐管-主管流れのティ圧損係数(-)、 $K_c'$  = 集合管の主管-主管流れのティ圧損係数(-)  
 $K_b$  = 分岐管に含まれるフィッティング類(弁,オリフィスなど)の合計圧損係数(-)、  
 $\lambda$  = 分岐管の管摩擦損失係数(-)、 $\lambda'$  = マニホールド主管の摩擦損失係数(-)  
 $K$  = 分岐管側の圧損係数(-)、 $K'$  = 主管側の圧損係数(-)、  
 分岐管の粗さ補正係数(-) :  $C_r$ 、主管の粗さ補正係数(-) :  $C_r'$

$R_e$  = 分岐管のレイノルズ数(-)、 $R_e'$  = 主管のレイノルズ数(-)、 $\mu$  = 流体粘性係数(Pa・s)、  
 $\varepsilon$  = 分岐管の内面粗さ(m)、 $\varepsilon'$  = 主管の内面粗さ(m)

$f$  = 分岐点の分流率[=分岐管流量/分流前主管流量] or 合流率[=分岐管流量/合流後主管流量](-)  
 $f_N$  = N 番目の分岐点の分流率(-)、 $f_0$  = 0 番目の分岐点(仮想)の分流率 [=0]、  
 $F$  = 主流率[=(分岐後の主流量)/(分岐前の主流量)]の累乗積、 $F_b$  = 更新前の変化率(-)

サフィックス n-1, n, n+1 → いずれも分岐点の番号を示す。番号割り振りは図 2 参照のこと。

#### チャート 1 の脚注：

- (\*1)  $D_n$ ,  $L_n$ ,  $K_{bn}$  は、分岐管の圧損係数( $\lambda_n L_n / D_n + K_{bn}$ )を計算するためのパラメータ。ここで、各分岐管の相当長さ  $L_n$  は、レイノルズ数や管内粗さによってその圧損係数が変化するようなフィッティング(例えばエルボ、バンドなど)の相当長さを直管の長さに合算したものである。例えば 100A の分岐管がトータル 5m の直管と 2 個のロングエルボを持つなら、エルボの相当管長が約 20D の場合、分岐管相当長さ  $L = 5 + 2 \times 20 \times 0.1 = 9\text{m}$  になる。一方  $K_{bn}$  は、レイノルズ数や管内粗さにそれほど依存しないフィッティング類(弁やオリフィスなど)の合計圧損係数である。なお、分岐管端-容器の急拡大部分の出口圧損係数は  $K_{bn}$  に含めない。
- また場合によっては、分岐管内径  $D_n$  は 1 種類でないかも知れないが、そのときは各サイズの合計値になる。また分岐管始端と終端の流速が異なるときは動圧損失分の圧損係数を加算する。これについては末尾の補足説明を参照されたし。

- (\*2) 摩擦損失係数  $\lambda$  は Moody 線図によらずとも、次の Jain 式で十分近似できる。

$$R_e > 2000 : \quad \lambda = [1.14 - 2 \log_{10}(\varepsilon / D + 21.25 / R_e^{0.9})]^{-2}$$

- (\*3) JSME テキスト<sup>(1)</sup>では、ティ部の圧損係数  $K_d, K_d', K_c, K_c'$  の算定に古い Vaszanyi の式を用いているのでここでもそれを踏襲している。しかし今では Miller や伊藤の式の使用がスタンダードになっているのでそちらを使うべきなのかもしれない。伊藤式については下記の TS を参照のこと。

#### 【FE-14-RP-006 分岐管の圧損係数計算(Blevins ベース)】

- (\*4)  $C_r$  について。ティ圧損係数  $K_c, K_d$  には 粗さの影響が考慮されていないので、これを補正するもので、次式で定義される。

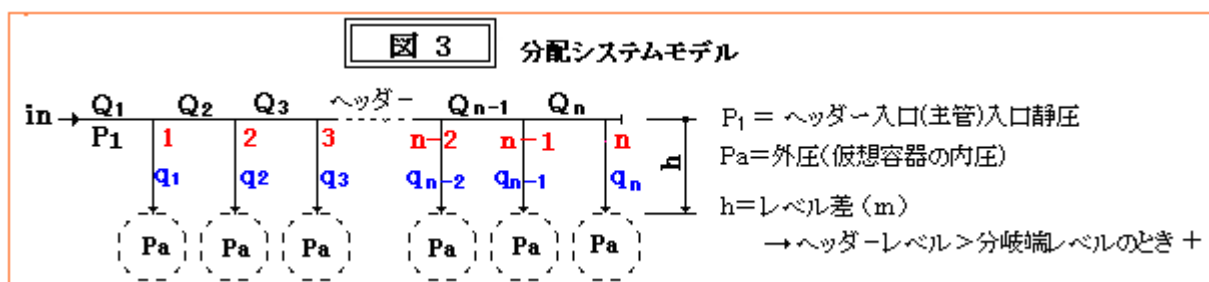
$C_r = \lambda_r / \lambda_s$  (ここで  $\lambda_r$  = 粗さ  $\varepsilon$  の管の摩擦損失係数、 $\lambda_s$  = 滑らかな管の摩擦損失係数)  
 $\lambda_r, \lambda_s$  は、相対粗さとレイノルズ数を用いて Jain の近似式から計算する。層流( $R_e < 2000$ )のときは粗さの影響は無視できるので  $C_r = 1.0$  とする。

## 2. [分配管 or 集合管]システムの流量配分計算法—分岐ピッチが短い場合

本計算法は JSME 技術資料<sup>(1)</sup>のⅢ編管路ダクト系の計画・設計例(A.プラント関係)の A.6「空気冷却への分岐配管」に記載されるもので、ここではプログラム計算ができるようにチャートの形にして示す。

なお、分配管と合流管は単に流れ方向が反転するだけで、流量配分の計算方法は全く同じ（ただ、流れ方向の違いによって分岐ティの圧損係数が違ってくる）。ここでは記述が煩雑になるのを避けて、分配管のみを対象にして計算手順を示す。

対象モデルは下図の通り。単相非圧縮性流れであって、各分岐管の端は圧力一定の容器(定圧のタンクとみなされる圧力源)につながっているものとする。各分岐管は同一サイズ、同一形状とする。また、ヘッダー入口流量(全流量)は既知とし、ヘッダーと分岐管端部の位置レベルの差異を考慮する。



計算では、分岐ピッチが短いので主管の摩擦圧損係数は無視し、主に流量の減少に伴う静圧回復で、マニホールド主管の圧力変化はカウントされる。分岐管の流量は主管—仮想容器の差圧で決まる。

計算手順はチャート 2 に示される。この場合、次のステップをとっている。

- ① まずヘッダー(主管)入口の静圧  $P_1$  を仮定する。
- ② そして 1 番目の分岐流量比 ( $q_1/Q_1$ )、ついで  $n$  番目の分岐流量比 ( $q_n/Q_1$ ) を求める。  
更に  $(n-1) \rightarrow (n-2) \rightarrow (n-3)$  と逆走して 2 番目の分岐流量比まで計算する。
- ③ 流量比の総和をカウントし、これが 1 にならない場合は、ヘッダー入口静圧  $P_1$  の設定を変更し、流量比の総和が 1 になるまで、 $P_1$  を変えながら上記②を反復する。

**チャート 2 : 分配管の流量配分計算手順**

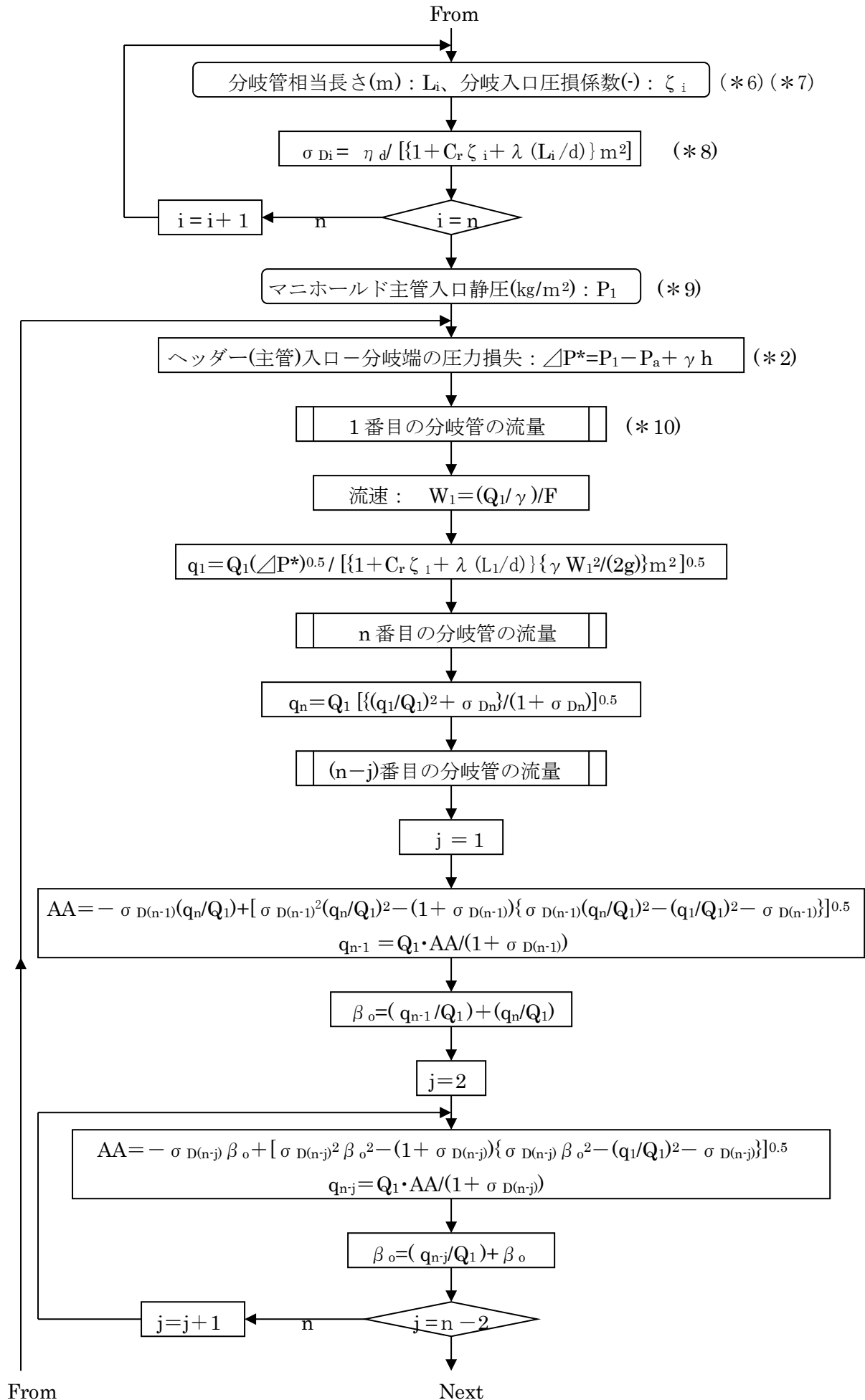
全流量(kg/s) :  $Q_1$ 、分岐点数/番号(-) :  $n$ 、流体比重量(kg/m<sup>3</sup>) :  $\gamma$ 、  
 分岐端の静圧(kg/m<sup>2</sup>) :  $P_a$ 、マニホールド主管内径(m) :  $D$ 、分岐管内径(m) :  $d$  (\*1)  
 主管-分岐端のレベル差(m) :  $h$ 、分岐管摩擦損失係数(-) :  $\lambda$ 、(\*2)(\*3)  
 デイフューザ係数(-) :  $\eta_d$ 、重力加速度(m/s<sup>2</sup>) :  $g$ 、粗さ補正係数(-) :  $C_r$  (\*4)(\*5)

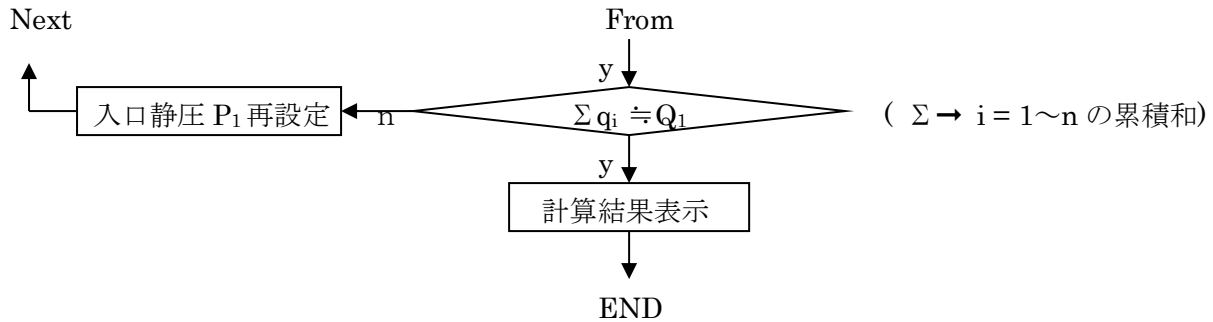
管断面積 :  $F = \pi D^2/4$ 、 $f = \pi d^2/4$   
 面積比 :  $m = F/f$

i = 1

Next







〈 チャート 2 記載の記号説明 〉

$Q_1$  = ヘッダー入口流量[全流量](kg/s)、 $q$  = 各分岐流量(kg/s)、 $Q$  = 各主管流量(図 3 による)(kg/s)、  
 $W_1$  = ヘッダ入口流速(m/s)、 $P_1$  = ヘッダー入口静圧(kg/m<sup>2</sup>)、 $P_a$  = 分岐端静圧[仮想容器内圧](kg/m<sup>2</sup>)  
 $\Delta P^*$  = ヘッダ入口-分岐端の圧損(kg/m<sup>2</sup>)、 $n$  = 分岐点数(-)、 $D$  = 主管内径(m)、 $d$  = 分岐管内径(m)、  
 $L$  = 分岐管の相当長さ(m)、 $h$  = 主管-分岐端のレベル差(m)、 $m$  = 面積比(-)、 $\gamma$  = 流体比重量(kg/m<sup>3</sup>)  
 $F$  = 主管流路断面積(m<sup>2</sup>)、 $f$  = 分岐管流路断面積(m<sup>2</sup>)、 $\lambda$  = 分岐管摩擦損失係数(-)、 $\beta_o$  = 累積流量比(-)、  
 $\zeta$  = 分岐入口圧損係数(-)、 $\eta_d$  = デイフューザ効率(-)、 $\sigma_D$  = 分流係数(-)、 $C_r$  = 分岐管の粗さ補正係数(-)  
 $n$  = 分岐管(分岐点)数ないし最終分岐管(分岐点)番号、 $i$  = 分岐管(分岐点)番号 = 1, 2, 3, …… n  
 $g$  = 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、 $q$ ,  $Q$ ,  $\sigma_D$  などに付帯するサフィックス → 当該する分岐管(分岐点)の番号を示す。

【 チャート 2 の脚注 】

- (\*1)  $P_a$  について。各分岐管の端は、例えば圧力一定の容器(定圧のタンクにみなされるような圧力源)につながっているものとする。 $P_a$  はその場合の容器内圧にあたる。例えば大気放出では大気圧になる。
- (\*2)  $h$  について。液の場合、ヘッダー(主管)と分岐管端の位置レベルの差があるとその液頭分  $\gamma h$  が入口静圧  $P_1$  に含まれているので、差圧からその液ヘッド分を加減したものが、主管～分岐管末端の差圧(=圧力損失)になる。この場合  $h$  は、主管レベル > 分岐管端レベルのとき即ち液が流下するときに + の値、主管レベル < 分岐管端レベルのとき即ち液が遡上するときに - の値をとるものとする。なお流体が気体の場合は、通常、ヘッド分は殆ど無視できるので  $h$  は零でよい。
- (\*3)  $\lambda$  について。各分岐管によって流量は変化するので分岐管ごとに設定する必要がある。しかし通常、各分岐管の流量には極端な差異がないので、近似的に均一流量( $q = Q_1/n$ )から分岐管のレイノルズ数  $Re$  を求め、これと管の相対粗さ  $\varepsilon/D$  から Moody 線図を用いて、全ての分岐管に共通の管摩擦損失係数  $\lambda$  を設定する。
- (\*4) 粗さ補正係数  $C_r$  は、チャート 1 の脚注(\*4)に同じ。その場合のレイノルズ数は、均一分岐流量  $q_n = Q_1/n$  から設定する。
- (\*5)  $\eta_d$  について。形状的に等しい各分岐管の流量に差異がでるのは、分流の後でヘッダー内の流速がダウンすることにより生じる静圧上昇、即ちデイフューザ効果による所が大きい。 $\eta_d$  はこのデイフューザ効果を表すもので、下記のように用いられる。

$$P_i - P_1 = \{ \gamma / (2g) \} \eta_d (W_1^2 - W_i^2) \quad (\text{但し } W = \text{主管流速})$$

文献(3)によれば、このデイフューザ係数  $\eta_d$  は、下図のようにレイノルズ数や流量比には余り影響

されず、内径比[d/D]に依存するので、 $\eta_d$ の設定は、図 10 に拠るものとする。



図 8  $\eta_{dm}$  と  $Re_H$  の関係

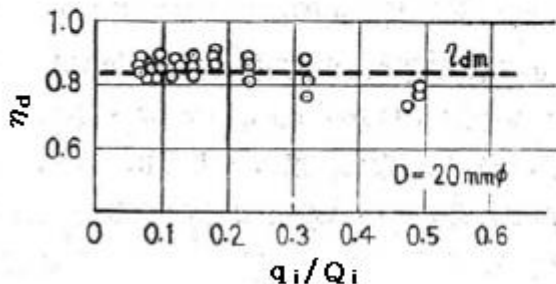


図 9 管寄せ内の  $\eta_d$  の分布

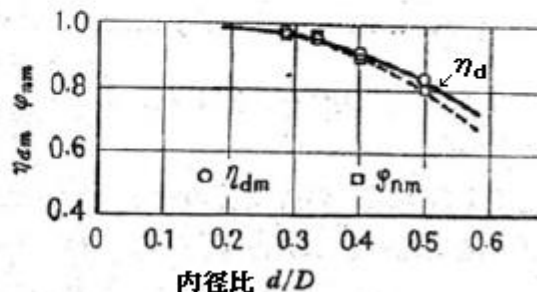


図 10  $\eta_{dm}$  および  $\phi_{nm}$  と  $d/D$  の関係

(\*6)  $L_i$  について。各分岐管にエルボや弁/オリフィス等のフィッティング類が含まれるときは、これらを相当長さでカウントし直管長さに加算して  $L_i$  とする。なお相当長さへ換算するのが面倒なときは圧損係数でこれらをカウントして分岐入口圧損係数  $\zeta$  の方に加算してもよい(要は分岐管の全圧損係数がカウントできればよい)。

(\*7)  $\zeta$  について。分岐入口の圧損係数はティ分岐の分岐流れのときの圧損係数式から求める。この場合、圧損は流量比 ( $q_i/Q_i$ ) に大きく依存するが、まだ ( $q_i/Q_i$ ) は未知なので、正確な圧損係数を得るには反復計算が必要になる。しかし通常、各分岐管の流量には極端な差異がでないので、近似的に均一分岐流量 ( $q=Q_i/n$ ) を、 $q_i$  に割り当てることができる。また  $Q_i$  は  $Q_1$  から逐次  $q_i$  を差し引いて計算できる。

圧損係数式としては次の伊藤式が良い ([FE-14-RP-006 分岐管の圧損係数(Blevins ベース)]参照)。

$$\zeta_i = (Q_i/q_i)^2 (d/D)^4 [1 - \{0.34 + 2(r/d) + (0.5/m)\} (q_i/Q_i) + \{(0.5 - 2.4r/d)m^2 + (0.62 + 2.4r/d)/m^2\} (q_i/Q_i)^2]$$

ここで  $r$  = ティ交叉部の丸み半径(m)、 $m$  = 主管/分岐管の断面積比 (=  $D^2/d^2$ )、この式は乱流に適用。層流域 ( $Re < 2000$ ) では、 $\zeta = 7000 / \{4q_i / (\pi d \mu)\}$  [但し  $\mu$  = 粘性係数 ( $Pa \cdot s$ )]

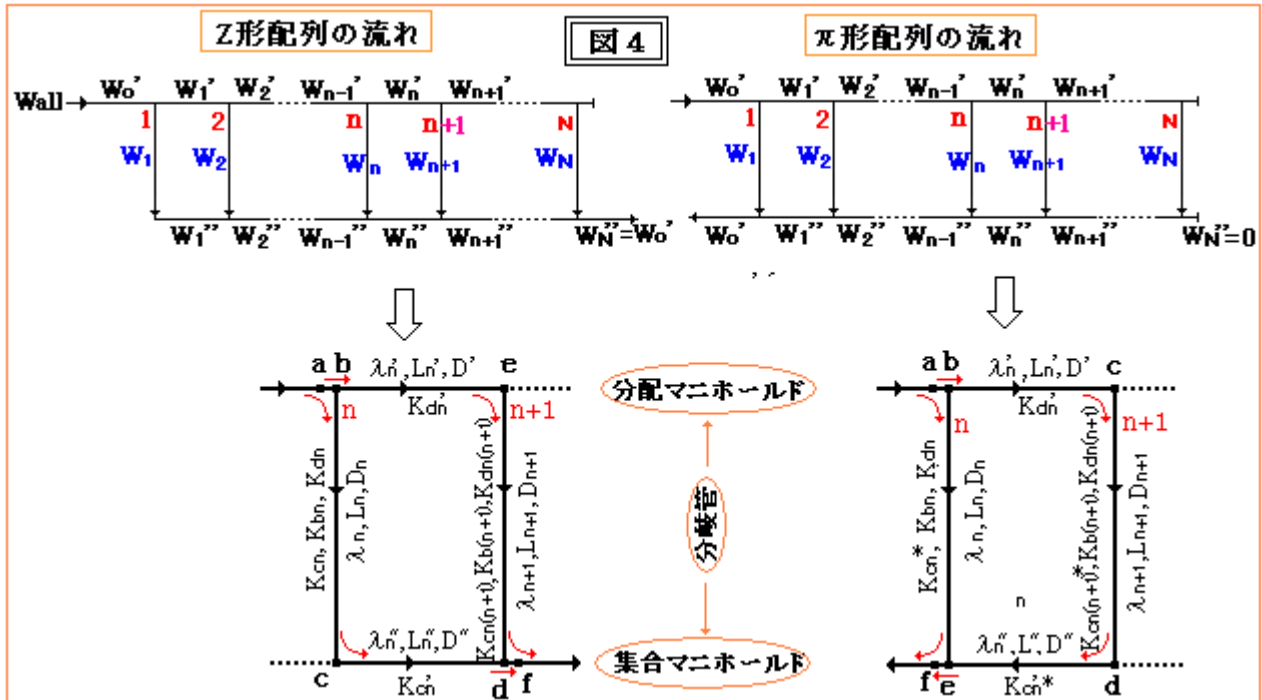
(\*8) 分流係数  $\sigma_D$  は分岐管の流量分布の特性を示す無次元数。オリジナル (JSME 資料) では、全分岐管一率になっているが、計算誤差が大きくなると思われるので、ここでは各分岐管毎に設定とした。

(\*9) 初めの  $P_1$  をどうセットするか? 標準的には、均一分配を仮定して分岐流量を  $q_1 = Q_1/n$  とし、全圧損係数  $K_1 (= \lambda L_1/d + \zeta_1)$  を設定して、1 番目の分岐管の圧損  $\Delta P = K_1 \{q_1^2 / (2g \gamma f^2)\}$  を求め  $P_1 = \Delta P + P_a - \gamma h$  の関係から、 $P_1$  の初期値を設定すればいいと思われる。

(\*10) 各分岐流量の計算法/計算式の詳細は、文献(3)の 2.2 を参照のこと。

4. [分配管+集合集管]システムの各分岐管流量の計算法—分岐ピッチが長い場合

本計算法は、前2項の方法を、[分配管+集合集管]システムに運用したものである。下記のZ形配列モデルとπ形配列モデルを考える。



まず Z形配列の流れについて。分岐ラインn,n+1の流れをみると、a~f間では

- ① 経路 a-b-c-d-f & ② 経路 a-b-e-d-f

の2つの経路がある。この2つの経路間の圧損(静圧降下)はひとしいので、

$$\begin{aligned} \Delta P_n + \Delta P_n'' &= \Delta P_n' + \Delta P_{n+1} \\ \Delta P_n &= K_n \times 0.5 \rho U_n^2 = K_n \times 0.5 \rho \{W_n / (\rho S_n)\}^2 \\ \Delta P_n'' &= K_n'' \times 0.5 \rho U_n''^2 = K_n'' \times 0.5 \rho \{W_n'' / (\rho S'')\}^2 \\ \Delta P_n' &= K_n' \times 0.5 \rho U_n'^2 = K_n' \times 0.5 \rho \{W_n' / (\rho S')\}^2 \\ \Delta P_{n+1} &= K_{n+1} \times 0.5 \rho U_{n+1}^2 = K_{n+1} \times 0.5 \rho \{W_{n+1} / (\rho S_{n+1})\}^2 \end{aligned}$$

よって  $K_n(W_n/S_n)^2 + K_n''(W_n''/S'')^2 = K_n'(W_n'/S')^2 + K_{n+1}(W_{n+1}/S_{n+1})^2 \dots\dots\dots(dc1)$

(dc1)式において、質量流量  $W_n, W_n', W_{n+1}, W_n''$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} W_n &= f_n W_{n-1}' = f_n F_{n-1} W_o' \\ W_n' &= W_n / f_n - W_n = \{(1 - f_n) / f_n\} W_n = \{(1 - f_n) F_{n-1} W_o'\} = F_n W_o' \\ W_{n+1} &= f_{n+1} W_n' = f_{n+1} \{(1 - f_n) / f_n\} W_n = f_{n+1} F_n W_o' \\ W_n'' &= W_o' - W_n' = W_o' - \{(1 - f_n) / f_n\} W_n = (1 - F_n) W_o' \end{aligned}$$

ここで、f=分流量 [=分岐流量/(分岐前の主流量)]、 $W_o'$ =全流量 (=W<sub>all</sub>)

F=主流率 [= (分岐後の主流量)/(分岐前の主流量)]の累乗積

例えば、 $F_n = (1 - f_1)(1 - f_2)(1 - f_3) \dots\dots\dots (1 - f_{n-1})(1 - f_n)$

また、圧損係数  $K_n, K_n', K_{n+1}, K_n''$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} K_n &= C_{rn} K_{dn} + \lambda_n (L_n / D_n) + K_{bn} + C_{rn} K_{cn} \\ K_n' &= C_{rn}' K_{dn}' + \lambda_n' (L_n' / D_n') \\ K_{n+1} &= C_{r(n+1)} K_{d(n+1)} + \lambda_{n+1} (L_{n+1} / D_{n+1}) + K_{b(n+1)} + C_{r(n+1)} K_{c(n+1)} \\ K_n'' &= C_{rn}'' K_{cn}'' + \lambda_n'' (L_n'' / D_n'') \end{aligned}$$

ここで  $K_d$ =主管-分岐管流れのテイ圧損係数(分配側)、 $K_c$ =分岐管-主管流れのテイ圧損係数(集合側)  
 $K_d'$ =主管-主管流れのテイ圧損係数(分配側)、 $K_c'$ =主管-主管流れのテイ圧損係数(集合側)、  
 $C_r$ =分岐管の粗さ補正係数(-)、 $C_r'$ 、 $C_r''$ =分配、集合マニホールド主管の粗さ補正係数(-)  
 $K_b$ =中間機器、分岐管フィティング類の合計圧損係数、 $\lambda$ =分岐管の管摩擦損失係数、  
 $\lambda'$ =分配マニホールドの管摩擦損失係数、 $\lambda''$ =集合マニホールドの管摩擦損失係数、  
 $L$ =分岐管の相当長さ、 $L'$ =分配マニホールド分岐ピッチ、 $L''$ =集合マニホールド分岐ピッチ  
 $D$ =分岐管内径、 $D'$ =分配マニホールド主管内径、 $D''$ =集合マニホールド主管内径

次に  $\pi$ 形配列の流れについて。分岐ライン  $n, n+1$  の流れをみると、 $a \sim f$  間では

$$\textcircled{1} \text{ 経路 } a-b-e-f \quad \& \quad \textcircled{2} \text{ 経路 } a-b-c-d-e-f$$

の2つの経路がある。この2つの経路間の圧損(静圧降下)はひとしいので、

$$\Delta P_n = \Delta P_n' + \Delta P_{n+1} + \Delta P_n'' \rightarrow \Delta P_n - \Delta P_n'' = \Delta P_n' + \Delta P_{n+1}$$

$$\Delta P_n, \Delta P_n'', \Delta P_n', \Delta P_{n+1} \text{ の式は、Z形配列の流れの場合と同じ。}$$

$$K_n(W_n/S_n)^2 - K_n''(W_n''/S'')^2 = K_n'(W_n'/S')^2 + K_{n+1}(W_{n+1}/S_{n+1})^2 \quad \text{-----}(dc2)$$

ここで、 $S$ =分岐管断面積、 $S'$ =分配マニホールド主管断面積、 $S''$ =集合マニホールド主管断面積

(dc2)式において、質量流量  $W_n, W_n', W_{n+1}$  はZ形配列の流れの場合と同じ。ただ  $W_n''$  は、

$$W_n'' = W_n' = \{(1-f_n)/f_n\} W_n = F_n W_n'$$

また圧損係数  $K_n, K_n', K_{n+1}, K_n''$  はZ形配列の流れにほぼ同じ。但し流れ方向の違いで  $K_c, K_c' \rightarrow K_c^*, K_c''$ 。

$$K_n = C_{rn} K_{dn} + \lambda_n (L_n/D_n) + K_{bn} + C_{rn} K_{cn}^*$$

$$K_n' = C_{rn}' K_{dn}' + \lambda_n' (L_n'/D')$$

$$K_{n+1} = C_{r(n+1)} K_{d(n+1)} + \lambda_{n+1} (L_{n+1}/D_{n+1}) + K_{b(n+1)} + C_{r(n+1)} K_{c(n+1)}^*$$

$$K_n'' = C_{rn}'' K_{cn}''^* + \lambda_n'' (L_n''/D'')$$

テイ圧損係数の  $K_d, K_d', K_c, K_c'$  は、層流( $Re \leq 2000$ )の場合、次の式による。

$$K_{dn} = \{(7000 - Re_n)/Re_n\} (S_n/S')^2 (W_{n-1}'/W_n)^2 + 1 \quad [\text{但し } Re_n = 4W_n/(\pi D_n \mu)]$$

$$K_{d(n+1)} = \{(7000 - Re_{(n+1)})/Re_{(n+1)}\} (S_{n+1}/S'')^2 (W_n'/W_{n+1})^2 + 1 \quad [\text{但し } Re_{(n+1)} = 4W_{n+1}/(\pi D_{n+1} \mu)]$$

$$K_{dn}' = \{(3650 - Re_n')/Re_n'\} (W_{n-1}'/W_n')^2 + 1 \quad [\text{但し } Re_n' = 4W_n'/(\pi D' \mu)]$$

$$K_{cn}^* = \{(7300 + Re_n)/Re_n\} (S_n/S'')^2 (W_{n-1}''/W_n)^2 - 1$$

$$K_{c(n+1)}^* = \{(7300 + Re_{(n+1)})/Re_{(n+1)}\} (S_{n+1}/S'')^2 (W_n''/W_{n+1})^2 - 1$$

$$K_{cn}''^* = \{(2100 + Re_n'')/Re_n''\} (W_{n-1}''/W_n'')^2 - 1 \quad [\text{但し } Re_n'' = 4W_n''/(\pi D'' \mu)]$$

$$K_{cn} = \{(7300 + Re_n)/Re_n\} (S_n/S')^2 (W_n''/W_n)^2 - 1$$

$$K_{c(n+1)} = \{(7300 + Re_{(n+1)})/Re_{(n+1)}\} (S_{n+1}/S'')^2 (W_{n+1}''/W_{n+1})^2 - 1$$

$$K_{cn}' = \{(2100 + Re_n'')/Re_n''\} (W_{n+1}''/W_n'')^2 - 1$$

テイ圧損係数の  $K_d, K_d', K_c, K_c'$  は、乱流( $Re > 2000$ )の場合、次の Vaszonyi の式による。

$$K_{dn} = 2.25 - 0.46(W_{n-1}'/W_n)(S_n/S'),$$

$$K_{d(n+1)} = 2.25 - 0.46(W_n'/W_{n+1})(S_{n+1}/S''),$$

$$K_{dn}' = 1.7 - 0.9(W_{n-1}'/W_n') - 0.8(W_{n-1}'/W_n')^2$$

$$K_{cn}^* = 2.5(W_{n-1}''/W_n)(S_n/S'') \{(W_{n-1}''/W_n)(S_n/S'') - 0.205(W_n/W_{n-1}'') - (S_n/S'') (W_n''/W_n)^2\} - 0.5$$

$$K_{c(n+1)}^* = 2.5(W_n''/W_{n+1})(S_{n+1}/S'') \{(W_n''/W_{n+1})(S_{n+1}/S'') - 0.205(W_{n+1}/W_n'')$$

$$- (S_{n+1}/S'') (W_{n+1}''/W_{n+1})^2\} - 0.5$$

$$K_{cn}^* = 2.5(W_{n-1}''/W_n'')\{(W_{n-1}''/W_n'') - 0.205(S''/S_n)(W_n/W_{n-1}') - (W_n''/W_{n-1}')\} - 0.06$$

$$K_{cn} = 2.5(W_n''/W_n)(S_n/S'')\{(W_n''/W_n)(S_n/S'') - 0.205(W_n/W_n'') - (S_n/S'') (W_{n-1}''/W_n)2\} - 0.5$$

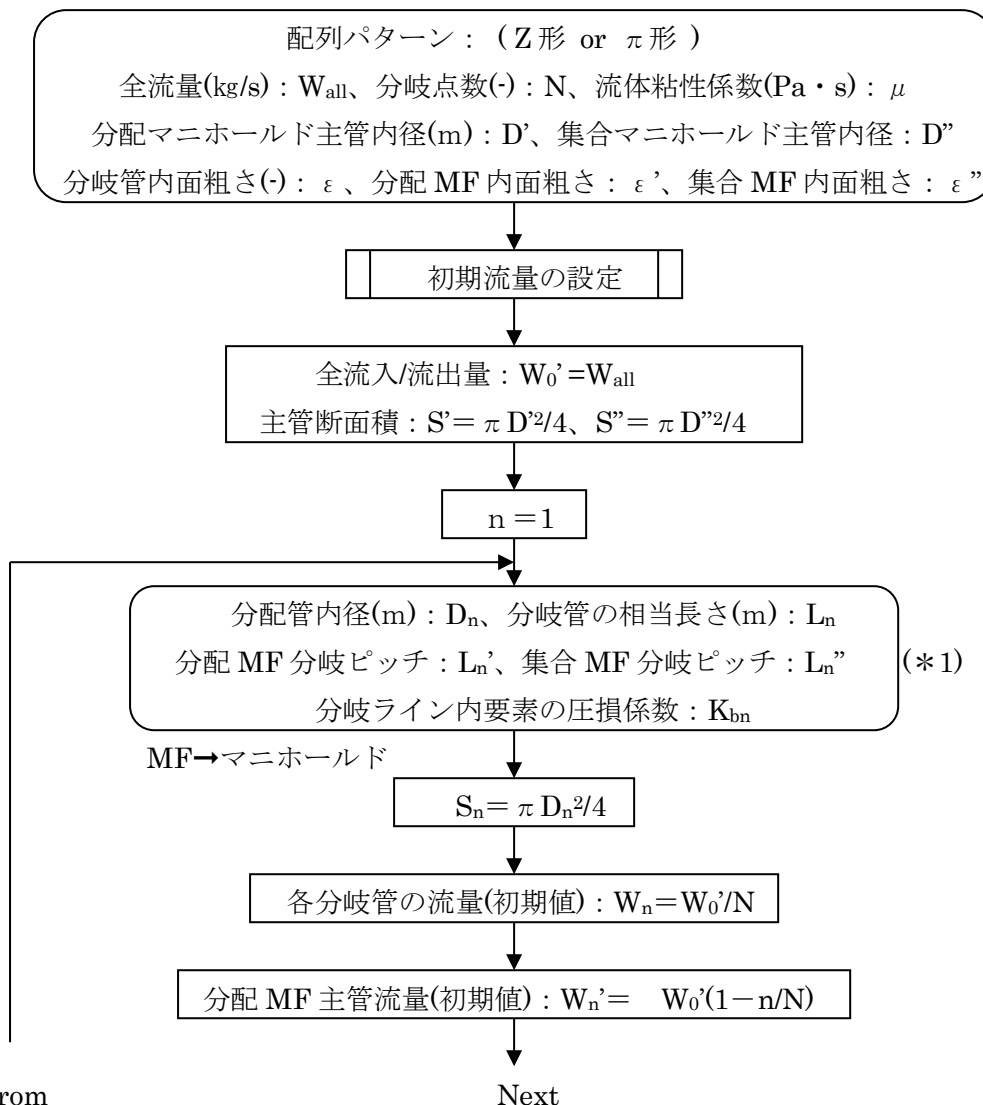
$$K_{c(n+1)} = 2.5(W_{n+1}''/W_{n+1})(S_{n+1}/S'')\{(W_{n+1}''/W_{n+1})(S_{n+1}/S'') - 0.205(W_{n+1}/W_{n+1}') - (S_{n+1}/S'') (W_n''/W_{n+1}')2\} - 0.5$$

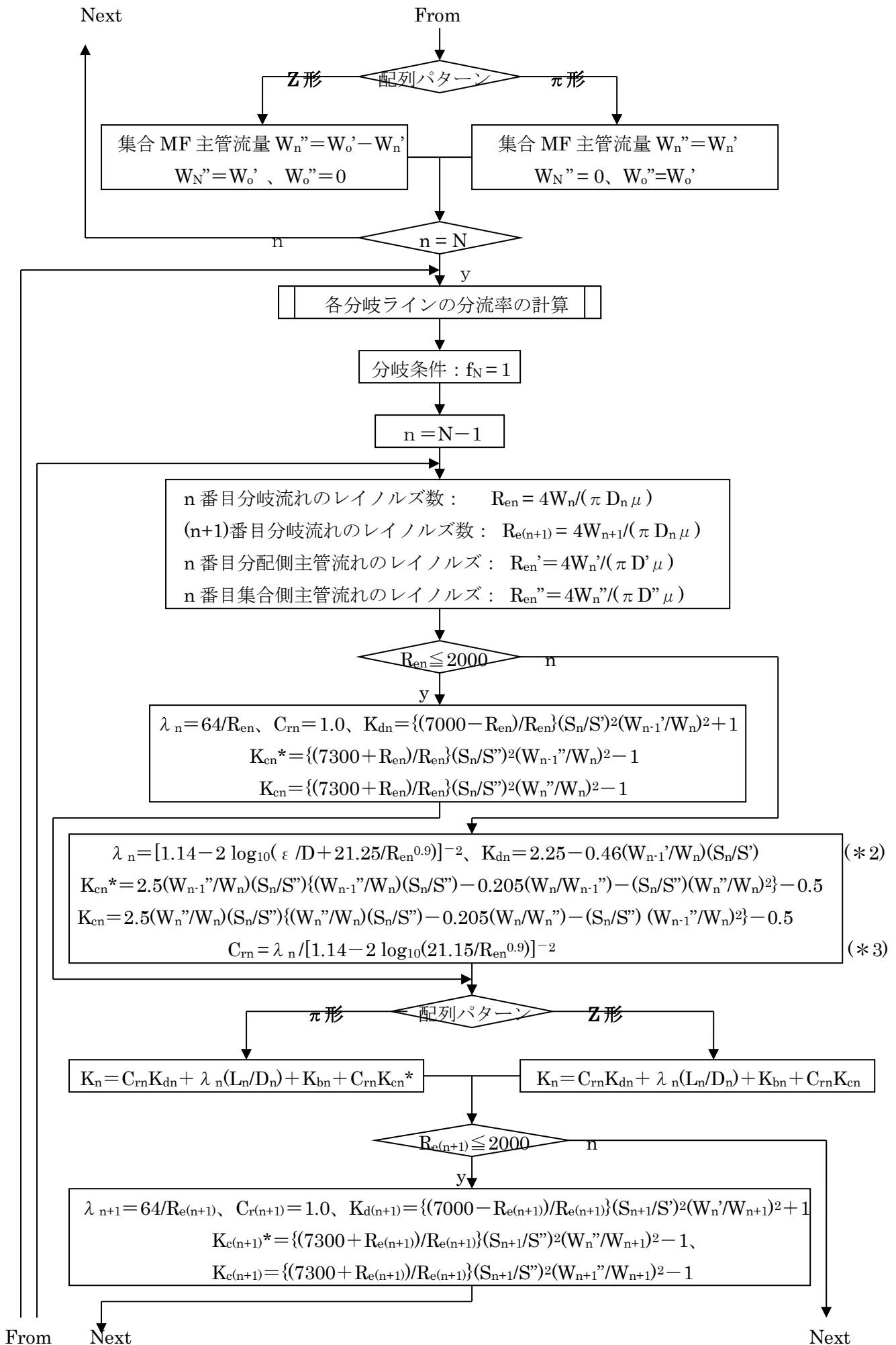
$$K_{cn}' = 2.5(W_{n+1}''/W_n'')\{(W_{n+1}''/W_n'') - 0.205(S''/S_n)(W_{n+1}/W_n'')(W_{n+1}/W_{n+1}') - (W_n''/W_{n+1}')\} - 0.06$$

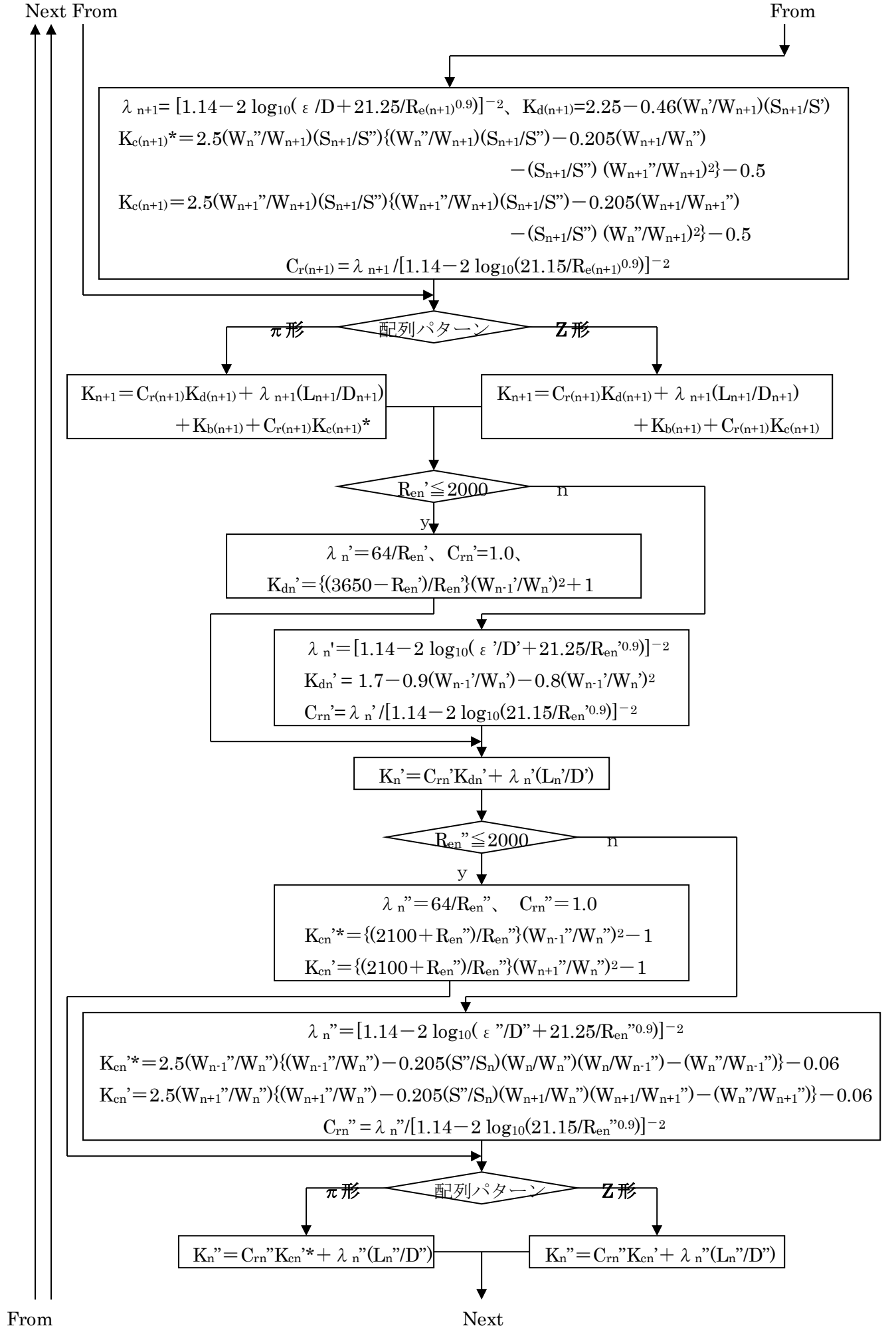
計算ステップは以下のようになる。また計算手順を**チャート 3**に示す。

- ステップ 1： 入力データを準備し、各部の初期設定流量を設定する。初期流量は、各分岐管に均等に流量配分されるものとして設定する。
- ステップ 2： 圧損係数を求め、設定流量における分流率を反復計算によって(dc1),(dc2)式から求める。これを  $n=N-1 \rightarrow n=1$  まで繰り返す。
- ステップ 3： 計算された分流率を用いて各分岐管流量を計算する。この結果を初期設定値と比較して略々合致するまで、ステップ 2~3 を繰り返す。なお、2回目以降の各分岐の設定流量としてはその前の計算結果をそのまま用いる。

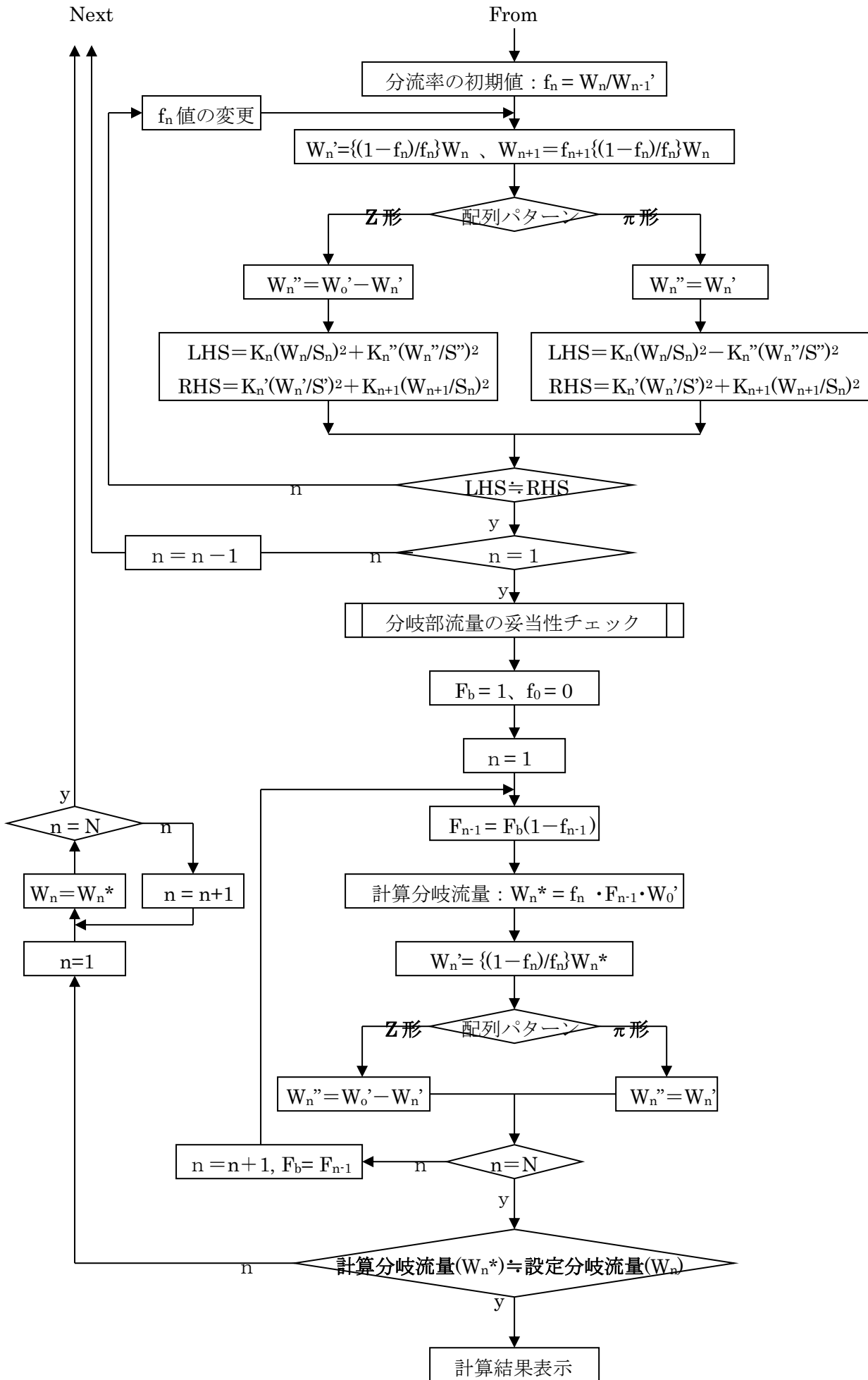
チャート 3：分配-集合システムの流量配分計算手順











### チャート 1 記載の記号説明：

$W_{all}$  = システムを通過する全流量(kg/s)、 $W_0'$  = 全流入/流出量(kg/s)、 $W$  = 分岐管流量(kg/s)、  
 $W'$  = 分配マニホールドの主管流量(kg/s)、 $W''$  = 集合マニホールドの主管流量(kg/s)  
 $N$  = 分岐管(分岐点)数ないし最終分岐管(分岐点)番号、 $n$  = 分岐管(分岐点)番号 = 1, 2, 3, …… N  
 $D$  = 分岐管内径(m)、 $D'$  = 分配マニホールド主管内径(m)、 $D''$  = 集合マニホールド主管内径(m)、  
 $S$  = 分岐管断面積(m<sup>2</sup>)、 $S'$  = 分配マニホールド主管断面積(m<sup>2</sup>)、 $S''$  = 集合マニホールド主管断面積(m<sup>2</sup>)  
 $L$  = 分岐管相当長さ(m)、 $L'$  = 分配マニホールド分岐ピッチ(m)、 $L''$  = 集合マニホールド分岐ピッチ(m)

$K_d$  = 主管-分岐管流れのティ圧損係数(分配側)、 $K_c$  = 分岐管-主管流れのティ圧損係数(集合側)  
 $K_d'$  = 主管-主管流れのティ圧損係数(分配側)、 $K_c'$  = 主管-主管流れのティ圧損係数(集合側)、  
 $K_b$  = **中間機器**、分岐管フィティング類の合計圧損係数、 $\lambda$  = 分岐管の管摩擦損失係数、  
 $\lambda'$  = 分配マニホールド主管の管摩擦損失係数、 $\lambda''$  = 集合マニホールド主管の管摩擦損失係数、  
 $C_r$  = 分岐管の粗さ補正係数(-)、 $C_r'$ 、 $C_r''$  = 分配、集合マニホールド主管の粗さ補正係数(-)  
 $\varepsilon$  = 分岐管の内面粗さ(m)、 $\varepsilon'$ 、 $\varepsilon''$  = 分配、集合マニホールド主管の内面粗さ(m)  
 $Re$  = レイノルズ数(-)、 $\mu$  = 流体粘性係数(Pa・s)、  
 $f$  = 分岐点の分流(合流)率 [= 分岐管流量/分流前の主管流量] (-)、  
 $f_N$  = N 番目の分岐点の分流率(-)、 $f_0$  = 0 番目の分岐点(仮想)の分流率 [= 0]、  
 $F_n$  = 主流率 [= (分岐後の主流量)/(分岐前の主流量)] の累乗積 =  $(1-f_1)(1-f_2)(1-f_3)\cdots(1-f_{n-1})(1-f_n)$   
 $F_b$  = 更新前の主流率(-)、 サフィックス  $n \rightarrow$  分岐点の任意の番号 (= 1, 2, 3, …… N)

### チャート 1 の脚注：

- (\*1)  $D_n$ ,  $L_n$ ,  $K_{bn}$  は、分岐管の圧損係数( $\lambda_n L_n / D_n + K_{bn}$ )を計算するためのパラメータ。ここで各分岐管の相当長さ  $L_n$  は、レイノルズ数や管内粗さによってその圧損係数に変化するようにフィッティング(例えばエルボ、バンドなど)の相当長さと直管の長さを合算したものである。例えば 100A の分岐管がトータル 5m の直管と 2 個のロングエルボを持つなら、エルボの相当管長は約 20D であるから分岐管相当長さ  $L = 2 + 2 \times 20 \times 0.1 = 6m$  になる。 $K_{bn}$  はレイノルズ数や管内粗さにそれ程依存しないフィッティング類(弁やオリフィスなど)および**ライン中におかれた機器類**の合計圧損係数である。**機器類の圧損係数は  $K_b = \Delta P_m / (0.5 \rho U_{bm})$  とする。ここで  $\Delta P_m$  = 均一分布流量に対するノズル～ノズル間の機器圧損(Pa)、 $U_{bm}$  = 均一分布流量における分岐流速(m/s)、 $\rho$  = 密度(kg/m<sup>3</sup>) とする。**  
 場合によっては、分岐管内径  $D_n$  は 1 種類でないかも知れないが、そのときは各サイズの合計値になる。また分岐管始端と終端の流速が異なるときは**動圧損失分の圧損係数を加算**する。これについては末尾の補足説明を参照されたい。

- (\*2) 乱流の摩擦損失係数  $\lambda$  は Moody 線図によらずとも、次の Jain 式で近似できる。

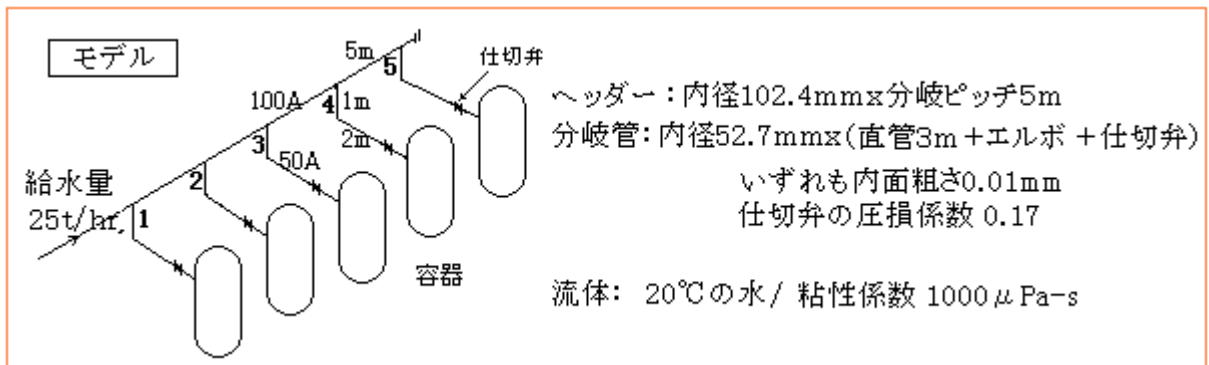
$$Re > 2000 : \quad \lambda = [1.14 - 2 \log_{10}(\varepsilon / D + 21.25 / Re^{0.9})]^{-2}$$

- (\*3)  $C_r$  について。ティ圧損係数  $K_c, K_d$  には 粗さの影響が考慮されていないので、これを補正するもので、次式で定義される。

$C_r = \lambda_r / \lambda_s$  (ここで  $\lambda_r$  = 粗さ  $\varepsilon$  の管の摩擦損失係数、 $\lambda_s$  = 滑らかな管の摩擦損失係数)  
 $\lambda_r, \lambda_s$  は、相対粗さとレイノルズ数を用いて Jain の近似式から計算する。層流( $Re < 2000$ )のときは粗さの影響は無視できるので  $C_r = 1.0$  とする。

#### 4. 例題 (JSME「管路・ダクトの流体抵抗」Ⅲ編A・7)

下図のような分配システムの分岐流量を見積もる。



全通過流量は  $W_{all}=W_0'=25000/3600=6.95$  kg/s、初期状態で均一分布を仮定すれば

分岐流量： $W_1=W_2=W_3=W_4=W_5=6.95/5=1.39$  kg/s

主管流量： $W_1'=5.56$  kg/s、 $W_2'=4.17$  kg/s、 $W_3'=2.78$  kg/s、 $W_4'=1.39$  kg/s、 $W_5'=0$  kg/s

初期状態について、まず分岐点  $n(=N-1)=4$  の分流率を計算する。

4 番目分岐流れのレイノルズ数： $Re_4=4W_4/(\pi D\mu)=4 \times 1.39/(3.1413 \times 0.0527 \times 0.001)=33586$

5 番目分岐流れのレイノルズ数： $Re_5=4W_5/(\pi D\mu)=4 \times 1.39/(3.1413 \times 0.0527 \times 0.001)=33586$

4 番目主管流れのレイノルズ数： $Re_4'=4W_4'/(\pi D'\mu)=4 \times 1.39/(3.1413 \times 0.1024 \times 0.001)=17285$

4 番目分岐管の摩擦損失係数/圧損係数/粗さ補正係数など：

$$\lambda_4=[1.14-2 \log_{10}(\varepsilon/D+21.25/Re_4^{0.9})]^{-2}=[1.14-2 \log_{10}(0.01/52.7+21.25/33586^{0.9})]^{-2}=0.0234$$

$$K_{d4}=2.25-0.46(W_3'/W_4)(S/S')=2.25-0.46 \times (2.78/1.39) \times (0.00218/0.008235)=2.006$$

$$K_{b4}=0.17=0.17, L_4=3+24 \times 0.0527=4.265\text{m} \quad (\text{エルボの相当管長 } 24D)$$

$$C_r=\lambda_4/[1.14-2 \log_{10}(21.15/Re_4^{0.9})]^{-2}=0.0234/[1.14-2 \log_{10}(0.01/52.7+21.25/33586^{0.9})]^{-2}=1.03$$

$$K_4=C_r K_{d4}+\lambda_4(L_4/D_4)+K_{b4}=1.03 \times 2.006+0.0234 \times 4.265/0.0527+0.17=4.12$$

5 番目分岐管の摩擦損失係数/圧損係数/粗さ補正係数など：

$$\lambda_5=[1.14-2 \log_{10}(\varepsilon/D+21.25/Re_5^{0.9})]^{-2}=[1.14-2 \log_{10}(0.01/52.7+21.25/33586^{0.9})]^{-2}=0.0234$$

$$K_{d5}=2.25-0.46(W_4'/W_5)(S/S')=2.25-0.46 \times (1.39/1.39) \times (0.00218/0.008235)=2.128$$

$$K_{b5}=0.17=0.17, L_5=3+24 \times 0.0527=4.265\text{m} \quad (\text{エルボの相当管長 } 24D)$$

$$C_r=\lambda_5/[1.14-2 \log_{10}(21.15/Re_5^{0.9})]^{-2}=0.0234/[1.14-2 \log_{10}(0.01/52.7+21.25/33586^{0.9})]^{-2}=1.03$$

$$K_5=C_r K_{d5}+\lambda_5(L_5/D_5)+K_{b5}=1.03 \times 2.128+0.0234 \times 4.265/0.0527+0.17=4.25$$

4 番目主管の摩擦損失係数/圧損係数/粗さ補正係数：

$$\lambda_4'=[1.14-2 \log_{10}(\varepsilon'/D'+21.25/Re_4'^{0.9})]^{-2}=[1.14-2 \log_{10}(0.01/102.4+21.25/17285^{0.9})]^{-2}=0.027$$

$$K_{d4}'=1.7-0.9\{W_3'/W_4'\}-0.8\{W_3'/W_4'\}^2=1.7-0.9\{2.78/1.39\}-0.8\{2.78/1.39\}^2=-3.3$$

$$C_r=\lambda_4'/[1.14-2 \log_{10}(21.15/Re_4'^{0.9})]^{-2}=0.027/[1.14-2 \log_{10}(0.01/102.4+21.25/17285^{0.9})]^{-2}=1.01$$

$$K_4'=C_r K_{d4}'+\lambda_4'(L_4'/D_4')=1.01 \times -3.3+0.027 \times 5/0.1024=-2.0$$

$$AA=1+[K_4/\{(S/S')^2 K_4'+f_5^2 K_5\}]^{0.5}=1+[4.12/\{(0.00218/0.008235)^2 \times -2+1^2 \times 4.25\}]^{0.5}=2.002$$

4 番目の分流量  $f_4 = 1/AA = 1/2.002 = 0.4995$

この計算を逐次繰り返して、次の結果を得る。

$$f_1 = 0.2117, \quad f_2 = 0.2545, \quad f_3 = 0.3338, \quad f_4 = 0.4995, \quad f_5 = 1$$

この分流量の結果から、分岐流量は、

$$W_1^* = W_0' \cdot F_0 \cdot f_1 = 6.95 \times 1 \times 0.2117 = 1.471 \text{ kg/s (1.39)}$$

$$W_2^* = W_0' \cdot F_1 \cdot f_2 = 6.95 \times (1 - 0.2117) \times 0.2545 = 1.395 \text{ kg/s (1.39)}$$

$$W_3^* = W_0' \cdot F_2 \cdot f_3 = 6.95 \times (1 - 0.2117) \times (1 - 0.2545) \times 0.3338 = 1.364 \text{ kg/s (1.39)}$$

$$W_4^* = W_0' \cdot F_3 \cdot f_4 = 6.95 \times (1 - 0.2117) \times (1 - 0.2545) \times (1 - 0.3338) \times 0.4995 = 1.359 \text{ kg/s (1.39)}$$

$$W_5^* = W_0' \cdot F_4 \cdot f_5 = 6.95 \times (1 - 0.2117) \times (1 - 0.2545) \times (1 - 0.3338) \times (1 - 0.4995) \times 1 = 1.362 \text{ kg/s (1.39)}$$

またヘッダ流量は、

$$W_1' = \{(1 - f_1)/f_1\} W_1^* = \{(1 - 0.2117)/0.2117\} \times 1.471 = 5.479$$

$$\text{同様に、} W_2' = 4.084, \quad W_3' = 2.721, \quad W_4' = 1.362$$

分岐流量の計算値と設定値は合わないのので、計算値を設定値に変えて上記と同様の計算を行った。しかし若干合わないのので、念のために再度、設定値を変えて計算したところ、ほぼ計算値と設定値が一致した。これら計算結果を下表に示す。#3 結果の  $W_n$  値がファイナルの分岐流量になる。

TRY#	n	分流量 $f_n$	$W_n$	$W_{n+1}$	$W_n'$	$W_{n-1}'$
#1設定	1	0.2	1.39	1.39	5.56	6.95
	2	0.25	1.39	1.39	4.17	5.56
	3	0.33	1.39	1.39	2.78	4.17
	4	0.5	1.39	1.39	1.39	2.78
	5	1	1.39	0	0	1.39
#1結果 #2設定	1	0.2116	1.471	1.395	5.479	6.95
	2	0.2542	1.395	1.364	4.084	5.479
	3	0.3339	1.364	1.359	2.721	4.084
	4	0.4995	1.359	1.362	1.362	2.721
	5	1	1.362	0	0	1.362
#2結果 #3設定	1	0.2102	1.461	1.396	5.489	6.95
	2	0.2542	1.396	1.367	4.094	5.489
	3	0.3339	1.367	1.362	2.727	4.094
	4	0.4995	1.362	1.365	1.365	2.727
	5	1	1.365	0	0	1.365
#3結果	1	0.2104	1.462	1.395	5.488	6.95
	2	0.2543	1.395	1.366	4.093	5.488
	3	0.3339	1.366	1.362	2.726	4.093
	4	0.4995	1.362	1.364	1.364	2.726
	5	1	1.364	0	0	1.364

この結果では分岐流量はヘッダ始端で大きく、末端に向かって減少する。これは分岐ピッチが長く分岐点通過後の主流の静圧回復を摩擦による圧損が上回ってヘッダ圧力がスローダウンしたためと思われる。そこで、分岐ピッチ  $L$  を 5m から 2m に変更して、計算した所、次のように分岐流量が変化した。分岐流量は終端に向かって上昇する。静圧回復の影響が摩擦損失を上回ったためと思う。最大流量偏差は  $\{(1.438 - 1.39)/1.39\} \times 100 = 3.5\%$  になる。

	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
分岐流量 (kg/s)	1.327	1.362	1.397	1.426	1.438

補足説明：静圧降下バランス式について

1.項では、分配管における2つの流路の静圧降下のバランスを次のように表わした。

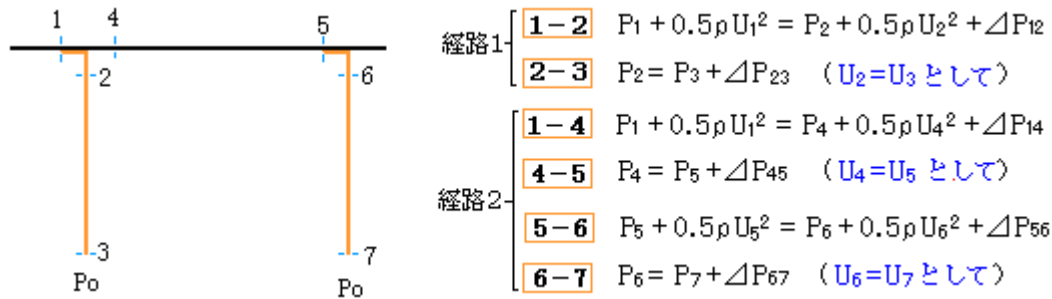
$$\Delta P_n = \Delta P_n' + \Delta P_{n+1} \rightarrow K_n (W_n/S_n)^2 = K_n' (W_n'/S')^2 + K_{n+1} (W_{n+1}/S_n)^2$$

$$\text{但し } \Delta P_n = K_n \times 0.5 \rho U_n^2 = K_n \times 0.5 \rho \{W_n/(\rho S_n)\}^2$$

$$\Delta P_n' = K_n' \times 0.5 \rho U_n'^2 = K_n' \times 0.5 \rho \{W_n'/(\rho S')\}^2$$

$$\Delta P_{n+1} = K_{n+1} \times 0.5 \rho U_{n+1}^2 = K_{n+1} \times 0.5 \rho \{W_{n+1}/(\rho S_n)\}^2$$

単純明快に見えるが、実際は少しややこしいので、下図を用いて詳しく説明する。



経路1については、次のようになる。

$$P_1 - P_2 = 0.5 \rho (U_2^2 - U_1^2) + \Delta P_{12} = \Delta P_{12}^*$$

$$+) \quad P_2 - P_3 = \Delta P_{23}$$

$$P_1 - P_3 = \Delta P_{12}^* + \Delta P_{23} \quad \text{-----(1)}$$

経路2についても、同じように、

$$P_1 - P_4 = 0.5 \rho (U_4^2 - U_1^2) + \Delta P_{14} = \Delta P_{14}^*$$

$$P_4 - P_5 = \Delta P_{45}$$

$$P_5 - P_6 = 0.5 \rho (U_6^2 - U_5^2) + \Delta P_{56} = \Delta P_{56}^*$$

$$+) \quad P_6 - P_7 = \Delta P_{67}$$

$$P_1 - P_7 = (\Delta P_{14}^* + \Delta P_{45}) + (\Delta P_{56}^* + \Delta P_{67}) \quad \text{-----(2)}$$

ここで、管の開放端の静圧は外圧に等しく  $P_3=P_0$ 、 $P_6=P_0$  であるから、(1)式=(2)式。故に

$$\Delta P_{12}^* + \Delta P_{23} = (\Delta P_{14}^* + \Delta P_{45}) + (\Delta P_{56}^* + \Delta P_{67}) \quad \text{-----(3)}$$

この式で、左辺の  $(\Delta P_{12}^* + \Delta P_{23}) \rightarrow$  冒頭の静圧バランス式の左辺の  $\Delta P_n$

右辺の  $(\Delta P_{14}^* + \Delta P_{45}) \rightarrow$  冒頭の静圧バランス式の右辺の  $\Delta P_n'$

右辺の  $(\Delta P_{56}^* + \Delta P_{67}) \rightarrow$  冒頭の静圧バランス式の右辺の  $\Delta P_{n+1}$

ここで注目すべきは、ティ分岐部の静圧降下  $\Delta P_{12}^*$ 、 $\Delta P_{14}^*$ 、 $\Delta P_{56}^*$  である。 $\Delta P_{23}$ 、 $\Delta P_{67}$ 、 $\Delta P_{45}$  は管部分の通常圧力損失であるが、 $\Delta P_{12}^*$ 、 $\Delta P_{14}^*$ 、 $\Delta P_{56}^*$  はティ通過によるもので、いずれも **動圧変化+全圧損失**の形をとる（例えば  $\Delta P_{12}^*$  では、動圧変化項  $0.5 \rho (U_2^2 - U_1^2)$  + 全圧損失  $\Delta P_{12}$ ）。

全圧損失  $\Delta P_{12}$  は、 $\Delta P_{12} = 0.5 \rho (U_1^2 - U_2^2) + (P_1 - P_2)$  であって、静圧変化+動圧変化になる。通常ティ分岐の圧損はこの  $\Delta P_{12} (= K \times 0.5 \rho U^2)$  で定義されており、圧損係数  $K$  に比例して増減する。例えば、伊藤文献<sup>(4)</sup>における圧損係数  $K$  は、

$$K = 1 - \{0.34 + 2(r/d_3) + (0.5/m)\} (Q_3/Q_1) + \{[0.5 - 2.4(r/d_3)]m^2 + [0.62 + 2.4(r/d_3)]/m^2\} (Q_3/Q_1)^2$$

記号定義はさておき、この場合、通常ベースではこの  $K$  値は小さく大雑把に  $0.5 \sim 1.2$  程度になる。

$\Delta P_{12}^*$ は $\Delta P_{12}$ に 動圧  $0.5 \rho (U_2^2 - U_1^2)$ を加えたもので、この動圧変化項は圧損係数 0.5～1.0に相当するので、 $\Delta P_{12}^*$ における圧損係数  $K$ は、ごく大雑把に 1～2.2 程度になることが予想される。

一方、静圧降下バランス式 [ $\Delta P_n^* = \Delta P_n' + \Delta P_{n+1}$ ]では Vaszanyi の圧損係数が使われており、静圧降下 $\Delta P_{12}^*$ の圧損係数  $K$ は、Vaszanyi の圧損係数に該当する。Vaszanyi の圧損係数は、

$$K = 2.25 - 0.46(W_n'/W_{n+1})(S/S')$$

である。この式では  $K$ は 1～2.2 程度になり、前述の伊藤式ベースの予想とマッチする傾向がある。

式のフォームからみて判るように、Vaszanyi 式は古く、伊藤式のように面積比  $m$  やコーナー丸み  $r$  が含まれていない。本 TS では、原本の JSME テキスト<sup>(1)</sup>通りに Vaszanyi 式を用いたが、精度向上の観点からは、 $\Delta P_{12}^*$ 、 $\Delta P_{14}^*$ 、 $\Delta P_{56}^*$ の圧損係数を、

$$K = [\text{伊藤式による圧損係数} + \text{動圧変化量 } 0.5 \rho (U_j^2 - U_i^2)] \div [0.5 \rho U_j^2]$$

などとするのが望ましい。

なお、Vaszanyi 式は乱流適用で、層流には不適と思われる。そこで、本 TS では上記の TS に記載された層流の全圧損失式を、上記の方法で加工して層流の圧損係数を設定している(詳細は割愛)。

後書き) ネットワーク(管路網)計算では、計算の収束性などの議論もあろうが、その計算精度のうえで **分岐点の圧損係数の影響は大きい**と思う。Flow-master は Miller の豊富な圧損データを使っており、それらデータの意味を理解し適正な曲線データを選ぶことで精度が向上する。しかし市販ソフトの中にはデータ不足で、かなりそのアウトプットの精度が劣るものもある(と思う)。従って Flow-master も含めて使用ソフト側に、どんなティ分岐データが用意されているのか、あるいは当該モデルに対しどのデータを使えばいいのか、予め意識する必要がある。

本計算法でも Miller データの運用が望ましいが、数値の加工や内外挿など煩雑な処理になる。伊藤の式であれば一応の蓋然性があり、扱いも容易なので、今後機会をみて改訂してゆきたい。

なお Vaszanyi 式については、余りに古すぎて手元に原文がないまま書き進めた。基本的には問題ないと思うが、原文を得て、修正すべきところがあれば今後改訂したい。

#### 引用文献)

- (1) JSME 技術資料<sup>(1)</sup>のⅢ編管路ダクト系の計画・設計例(A.プラント関係)の A.7「給水の分岐配管」および A.8「ガス捕集配管」
- (2) 同上 A.6「空気冷却器への分岐配管」
- (3)「管寄せの分流および合流に関する研究」久保、植田 (JSME Vol.34 No.268 S43.12)
- (4) 逸文：分岐、合流損失の理論および損失公式 伊藤英覚