

【整番】FE-14-TM-010	【標題】十字管の流れと圧損について
分類：流れ(流体振動)／種別：技術メモ	作成年月：H22.8／改訂：Ver0.0 (H22.8)
	作成者：N.Miyamoto

全 11 枚

1. はじめに

(1) 十字管は、プロセス配管ではあまり見かけないが、水配管やダクトなどの産業配管では多々、見受けられる。プロセス配管で余り採用されていないのは、例えば Appel の報文⁽⁶⁾にあるようにある種の不安定現象が懸念されるからでもある。実際に十字管流れには特色がある。ある流量比で分岐側に強い旋回流が発生し、更にランダムにその断面位置を変えて不安定になるからである。この現象は水平管のみならず垂直管でも現れる。その結果として、

定流量状態における静圧/損失係数 or 定差圧状態における流量/流速のピーク化と変動

を引き起こす。これらによって生じるハード面の影響は実際のところ少ないが、場合によって他の要素と複合し、システムの制御に障害を生じたり、低周波騒音や不規則振動となることも考えられる。

十字管継手はネットワーク配管を組み立てる上で効果的である。万一を懸念してこれを使用しないのは不利を招く。その場合、十字管流れの挙動を理解しておけば万一の懸念にも対応できる。以下、十字管流れの傾向と対処について述べる。

(2) 十字管流れに関する情報は決して少ない訳ではない。ここではよく書かれた文献(1)と文献(2)(3)の内容を要約して紹介する。なお文献(1)は通常の十字管、文献(2)(3)は枝管に傾斜のついたやや特異な十字管を対象にしている。故に一般性のある文献(1)の要約に枚数を割いた。

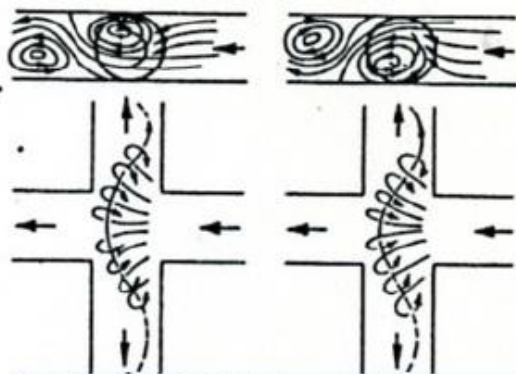


図-2 十字分岐管内に生ずる渦糸 [文献(1)]

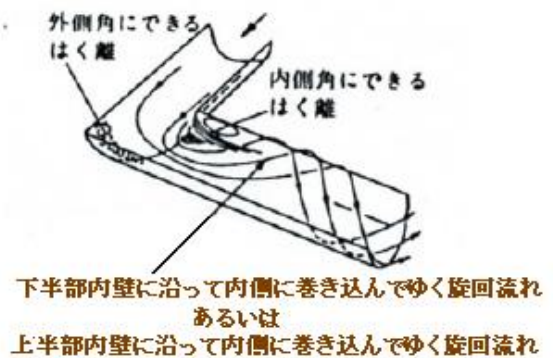


図-5 類似流れ構造 [文献(1)]

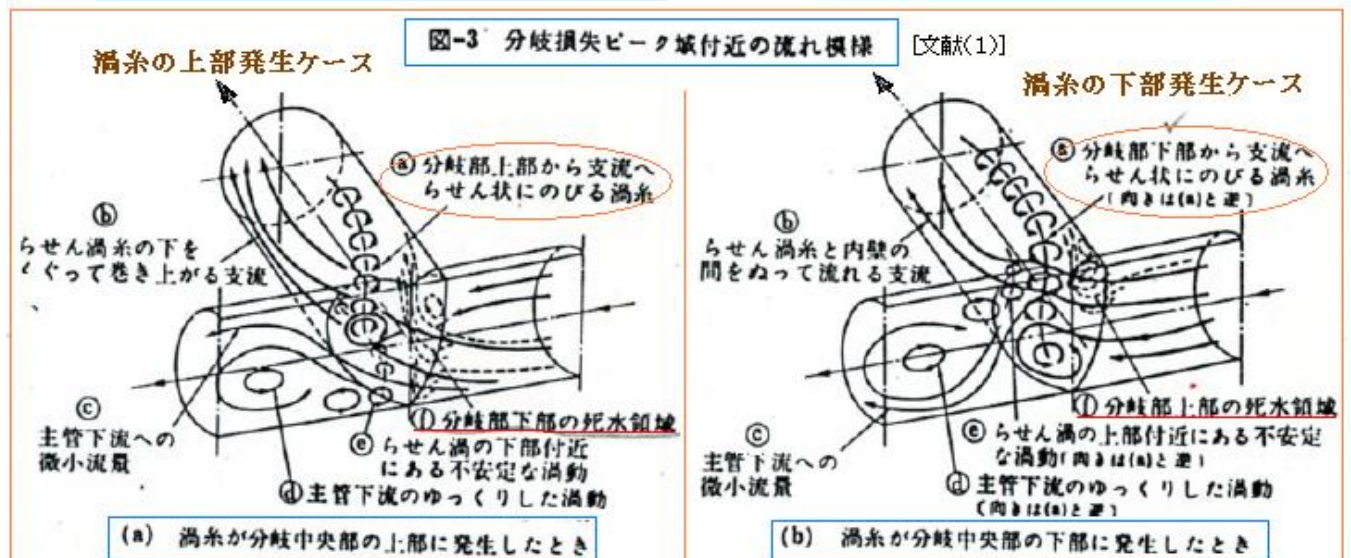


図-3 分岐損失ピーク域付近の流れ模様 [文献(1)]

渦糸の上部発生ケース

渦糸の下部発生ケース

(a) 渦糸が分岐中央部の上部に発生したとき

(b) 渦糸が分岐中央部の下部に発生したとき

2、通常の十字管の流れと圧損

典型的な十字管流れについては、水実験研究の結果を踏まえて文献(1)に詳しく議論されている。その要点を以下に紹介する。

(1) 流れの特異性(フローパターン)

通常の十字管流れでは、本管(主管)上流からの流れは2つの枝管(分岐管)へ分流するとともに、その残余は本管下流へ流れる(三つ又分岐)。この分岐流れにおいて、

- ・本管下流への流量比(本管への流入流量に対する分流流量の割合)が50%程度を割り込むと静圧変動が現われ、分岐損失係数の振れが次第に大きくなる。
- ・更に流量比が下がると振れのMaxポイントが次第に上昇し、本管下流への流量比が10~30%で、その残り70~90%を両枝管に等量またはこれに近い配分で分配するときに、分岐損失係数は最大ピークになる

この場合の損失係数の変化/変動を図-1に示す。観察によれば、流量比がダウンすると図-2に示すように、対向する枝管を貫いてラセン状の渦糸(旋回流れ)が発生する。後述するようにこの旋回流れによって、分岐損失係数の上昇とピーク化が起きる。

また、この差し渡しの渦糸は安定したものではなく、時々その位置を変えて上下し旋回方向を反転させる。この変化に追従して、静圧変動がおき損失係数が変化する。

観察された十字管流れの詳細を図3に示す。分岐曲がり部分の内側壁の剥離渦fが、渦糸の上下に伴って急速に移動するのが目立っているとのこと。

枝管の旋回流れは十字管固有の2次流れである。この2次流れの流動を、少し細かく観察すると、

- ① 圧損が最大になるときの流量比付近では、一つの渦(1方向の旋回流れ)が数分~数十分安定して存在する。 → 3次元2重曲り配管の旋回流れ(*)に似る
- ② 主管流量比 <0.1 又は >0.3 の時は一つの渦が安定することはなく1秒程度で他の渦に変化する。 → 図5の鋭角ベンドの流れ(**)に似る。

(*) 3次元2重曲り流れでは、第2エルボ直後に旋回方向の異なる強弱2つの流れが存在するがやがて一つの強い渦に統合して、かなり後流まで(~160d)まで存続する。

(**) 鋭角ベンド流れでは、ターン後、時計廻りと反時計廻りの旋回流れが周期的に繰り返される。

分岐後の2次流れの断面速度分布を図7に示す。形状的に強制渦+自由渦になっている。この分岐後の旋回流れによって余分な圧損(エネルギー損失)が付加される。その傾向は、

- ① 旋回が解消するまでかなりの管長が必要となる(図8,9参照),
- ② 旋回成分による遠心力効果で断面内の静圧は管壁で高くなりエネルギー損失を助長する(図10参照),
- ③ 旋回が強くなるほど、圧損(相当長さ)は指数関数的に増加する(図11参照),
- ④ 本管下流への流量比が0.2のとき(即ち圧損Maxの時)、流れ角 θ は最大になる(図12参照)。

なお、流量比 <0.1 or $>0.3(0.25)$ では、分岐管内の旋回流れが十分発達するまでもなくパターンが切り替わってしまうので圧損の付加は少ない。

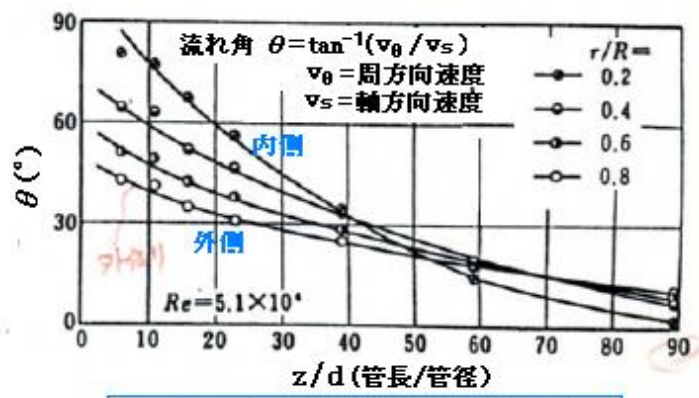


図-8 旋回流れと流れ角 [文献(1)より]

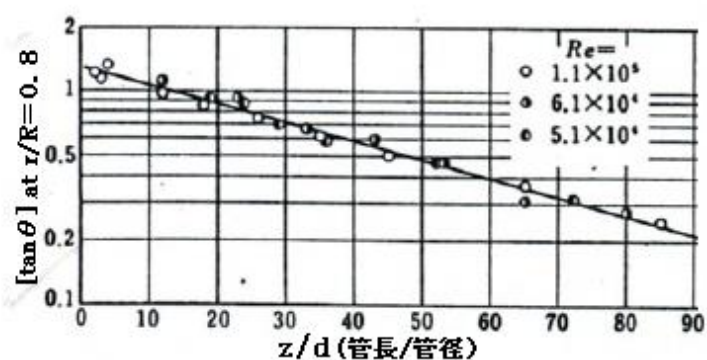


図9 旋回強さとその減衰 [文献(1)より]

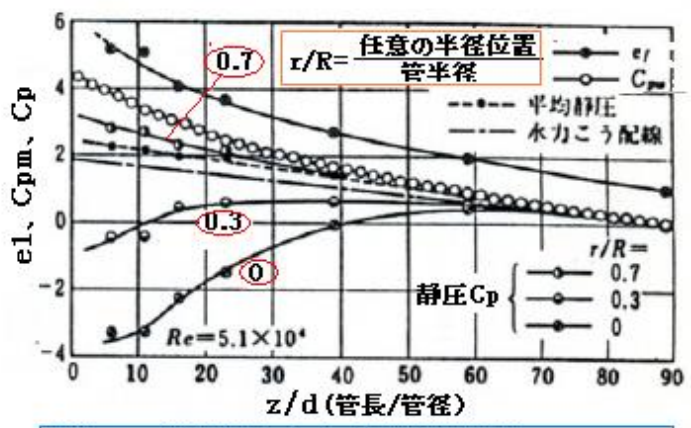


図-10 旋回流れにおける諸量変化 [文献(1)より]

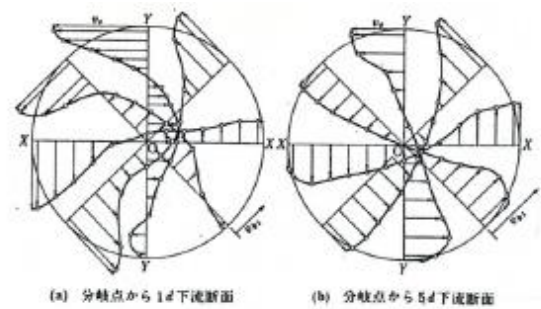


図-7 枝管内2次流れの速度分布 [文献(1)より]

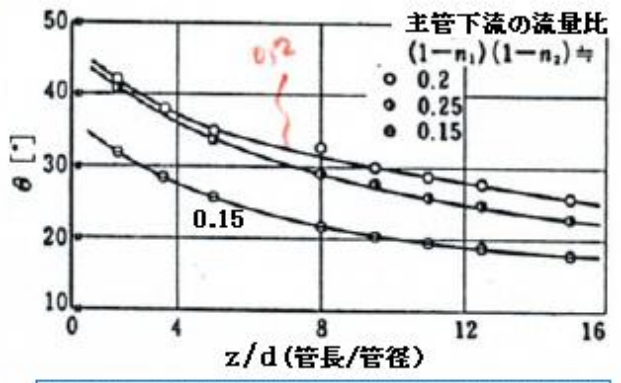


図-12 枝管内の流れ角の減衰 [文献(1)より]

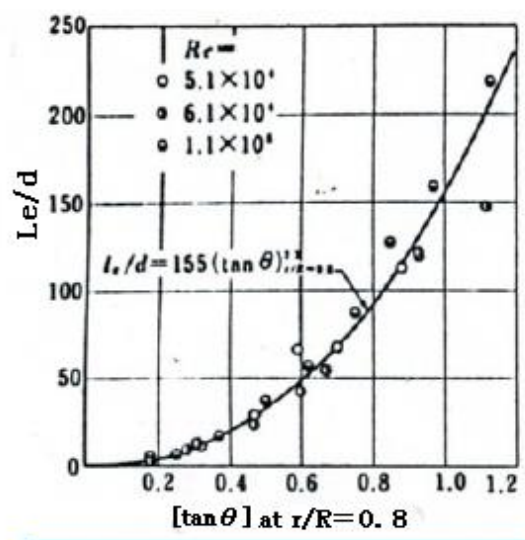


図-11 旋回強さと相当長さ [文献(1)より]

(2) 損失係数の全般傾向

- ① 本流側の損失係数に比べ、枝管側の損失係数がかなり高い。図-1と図-16を参照。
- ② 本管下流への流量比が0.5を下回るあたりから枝管側/本管側の損失係数の変動(静圧変動)が起きる。枝管側がより顕著にでる。これらは、渦糸の発生位置の異動と旋回方向の反転に対応する。図1の縦線を入れた部分が然り。図16でもこの傾向がみえる。
- ③ 本管下流への流量比が0.10~0.3になる辺りに枝管側損失係数のピークがある。主管側は少しこれよりずれる。これらは渦の強さのピークに対応したもの。図-1,16,17を参照。
- ④ 本管/枝管の面積比mが小さくなると圧損変動と損失係数ピークが高くなる(図-1vs 図-16)。
- ⑤ T管と比べると十字管の損失係数はかなり高くなる(同一流量で2~2.5倍)。図-1、図-16参照。
- ⑥ 対向する枝管の損失係数(ζ_{b1}, ζ_{b2})は、互いの流量比に影響を受ける(図17)。その場合、次のような関係式が、実験結果に合っている(図-18参照)。

$$\zeta_{b1} - \zeta_{b2} = m^2 \{ n_1^2 - (1-n_1)^2 n_2^2 \}$$

但し m = 本管/枝管の面積比、 n_1 = b_1 側枝管/本管の流量比、 n_2 = b_2 側枝管への流量割当率
 [なお、図 - 1, 16, 17, 18 における各流量比は多少わかりにくい。それぞれの流量比は、

本管 : 1、 左右枝管 : n_1 , $(1-n_1)n_2$ 、 本管下流 : $(1-n_1)(1-n_2)$

になる。例えば $n_1=0.3$ 、 $n_2=0.5$ であれば、枝管で 0.3、0.35、本管下流で 0.35 である。]

(3) 分岐損失の軽減と流れの変動防止

(1) 食い違い十字管を使用する(図-15, 図-19 参照)。

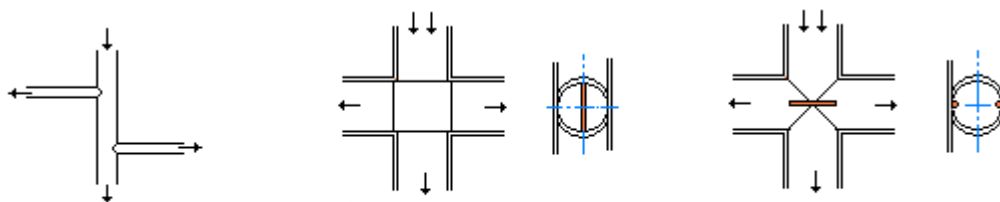
即ち枝管を完全に対向させないでずらす。食い違い量が大きい程、損失係数は低下する

(2) 分岐部に分離板を設置する(詳しくは文献(4)参照)。

渦糸を細分する。ある流量比のピークは抑えられるが、板壁の抵抗は追加される。

(3) 分岐部に小さな丸棒を設置する(図-20 参照)。

境界層の剥がれと関係すると思われる。損失増大の原因である強い旋回流は現われず通常の鋭角ベンドに近い流れになる。最適サイズがあるようだが、例えば図-20 では丸棒長さ=枝管内径、丸棒径= $\Phi 10$ /内径 $\Phi 125$ (内径の 0.1~0.15 倍)になっている。



(1) 食い違い十字管の採用

(2) 分離板(仕切り)の設置
(本管を上下に分割する形)

(3) 丸棒を上下に設置
(本管軸に直交する形)

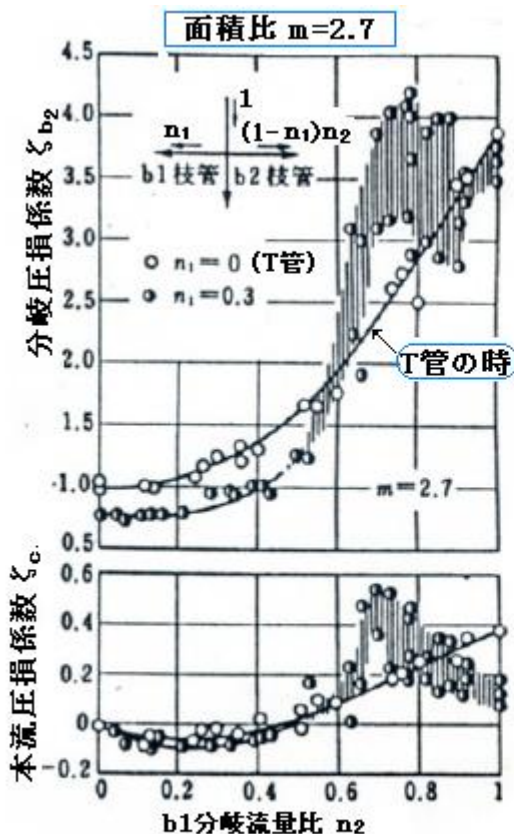


図-1 十字分岐管の本流/支流分岐圧損係数

[文献(1)抜粋]

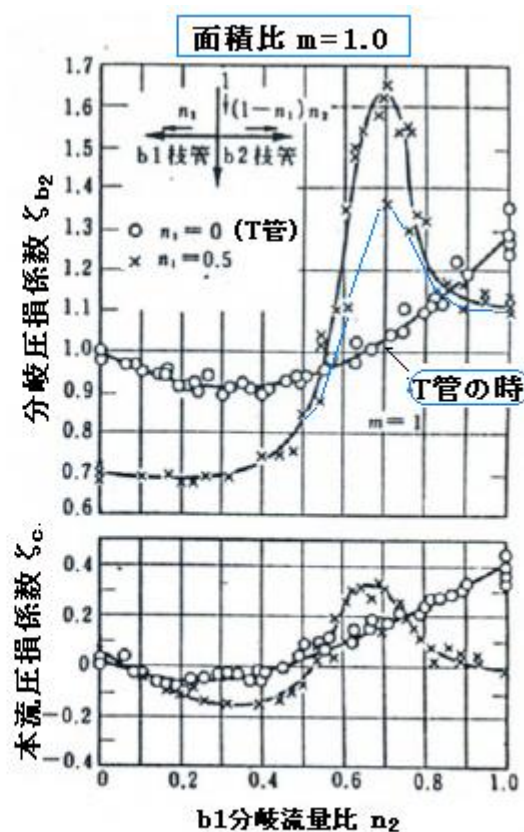


図-16 十字分岐管の本流/支流分岐圧損係数

[文献(1)抜粋]

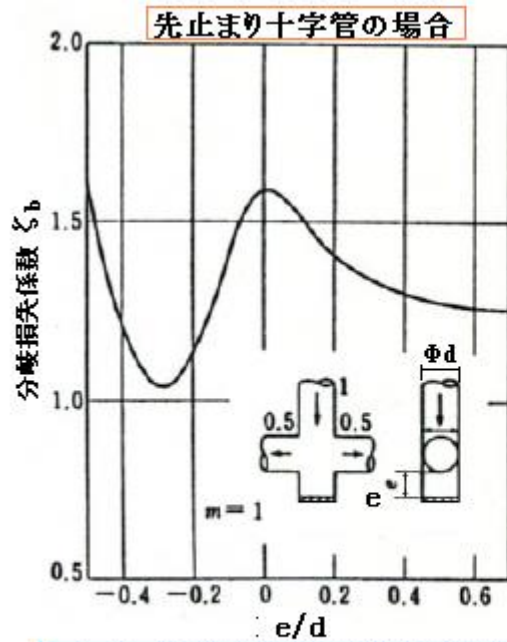


図-13 等量分配時の支流分岐損失係数と盲部分長さの関係
[文献(1)抜粋]

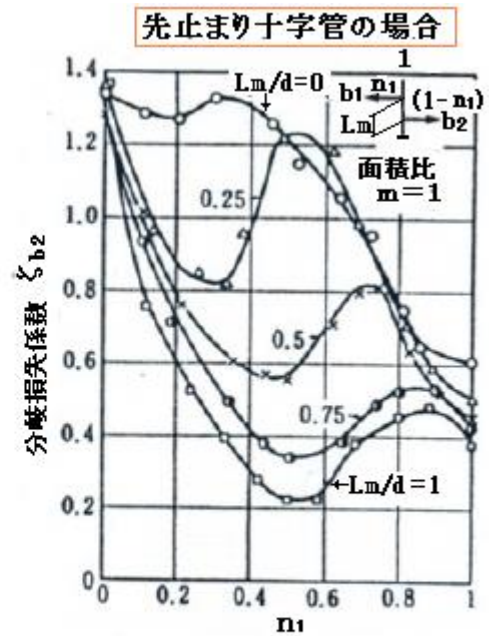


図-15 食い違い十字管の支流分岐損失係数-食違い量との関係
[文献(1)抜粋]

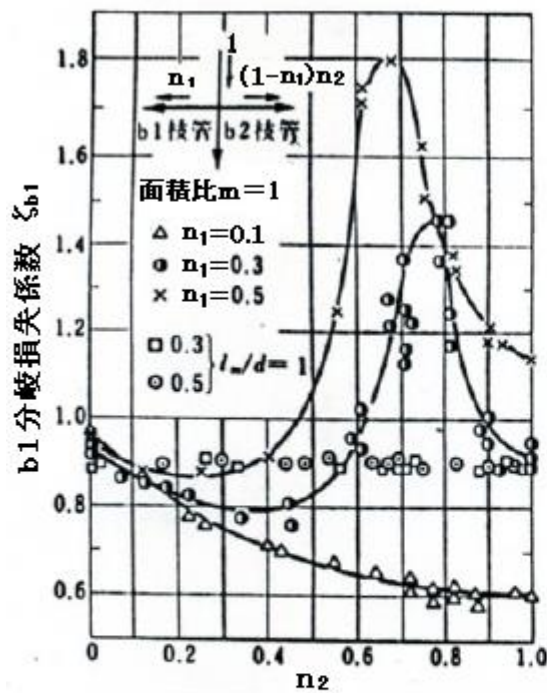


図-17 b1枝管の支流分岐損失係数
[文献(1)抜粋]

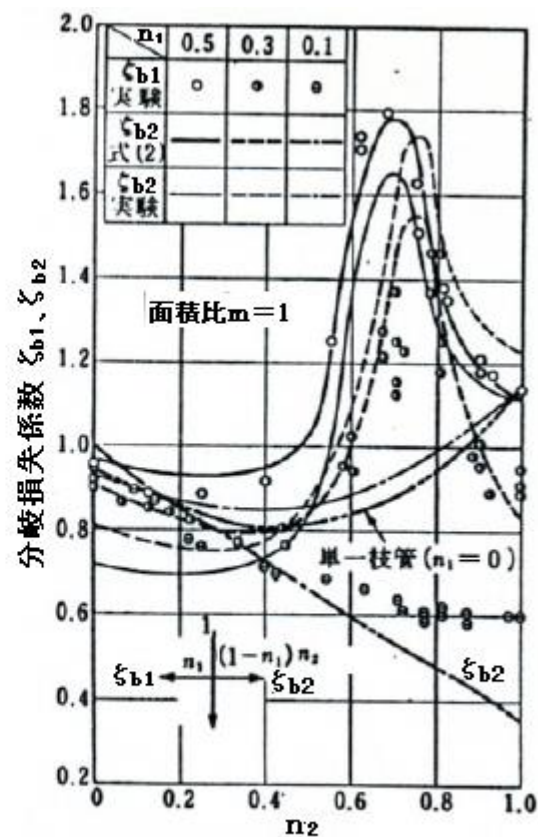


図-18 両支流分岐損失係数の関係
[文献(1)抜粋]

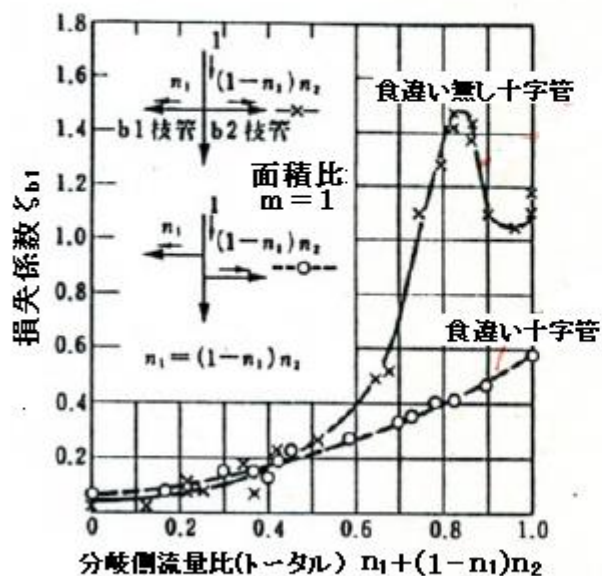


図-19 十字管と食違い十字管の損失係数

[文献(1)抜粋]

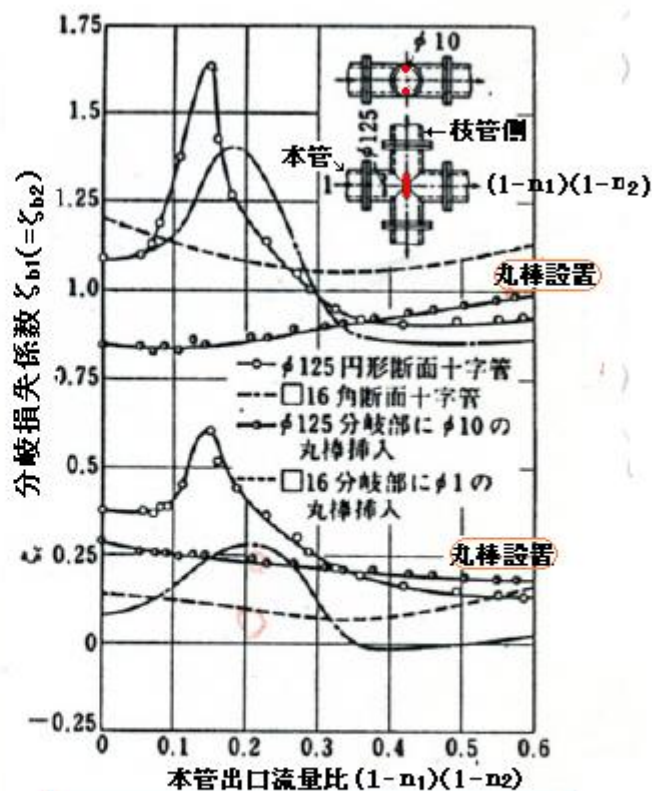


図-20 分岐部に丸棒を挿入した時の分岐圧損係数

[文献(1)抜粋]

3. 枝管に傾斜のついた十字管の流れと圧損

このやや特異な十字管流れについては、送風実験の結果から文献(2)(3)に詳しく議論されている。その結論を以下に転記する。

枝管の傾きが 11° における実験研究結果[文献(2)]:

- (0) ある流量域で、高低2種の流量状態が非周期的に繰り返されている(図4参照)。
- (1) 流量変動は十字管の左右支管内を貫通する渦芯をもつ旋回流の有無に起因している。即ち旋回流がない時は高流量状態になり、旋回流がある時は低流量状態になる。図7参照。
- (2) 左右支管内に旋回流がある時の左右支管方向への分岐損失係数は旋回流がない時の約2.3倍。(計測区間が短いのでこれは確定的でない?)
- (3) 高流量状態の十字分岐中心の外側(背部)の流動は不安定である(図7の不規則渦)。

分岐流量比と配管構造形状に関する実験結果[文献(3)]:

- (1) 流量変動は左右分岐支管の取り付け角が $8 \sim 20^\circ$ の場合の、特定の分岐流量比の範囲内で起きる(図3参照)。ここで分岐流量比=中央支管流量/本管流量。
- (2) 低流量状態では旋回強度が高いほど損失係数が大きい(図4参照)
- (3) 左右支管方向への分岐損失係数が極大となる分岐流量比は左右支管の取付け角が増すにつれて増大する(図8参照)。
- (4) 左右支管の流量比が約3:5の不均衡になると支管中央の流量比に依存した流量変動は発生しない(図5参照)。
- (5) 流動変動に及ぼす左右支管長さ及び中央支管入口長さの影響は明瞭ではない。

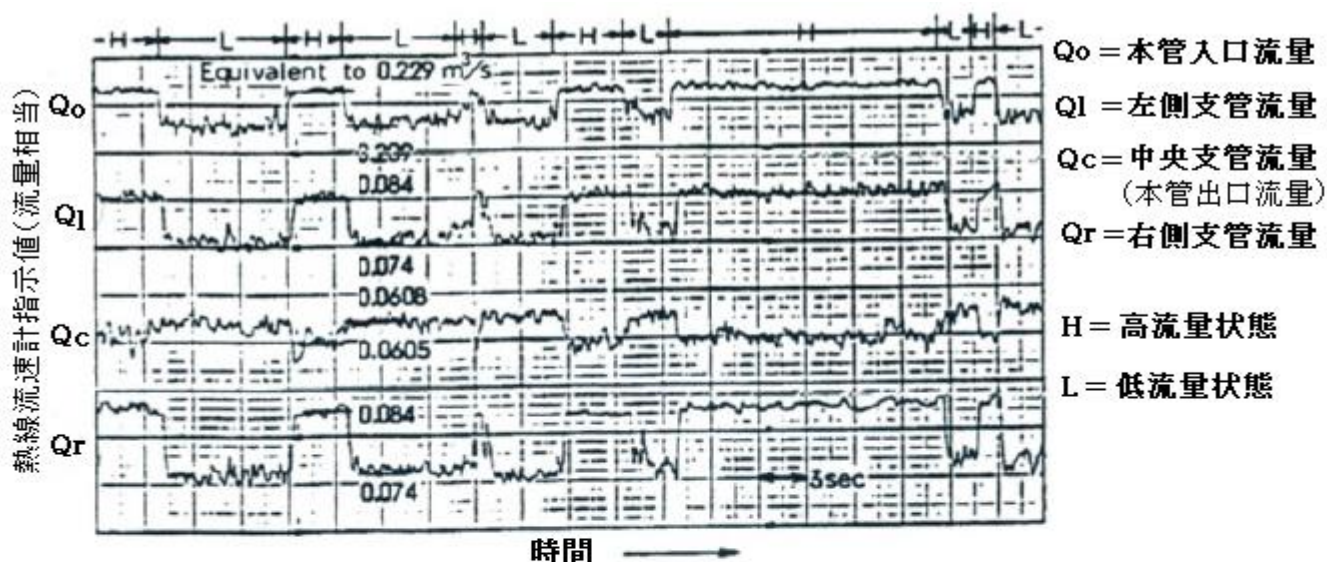


図4 本管及び各支管流量の変動記録の例 [文献(2)抜粋]

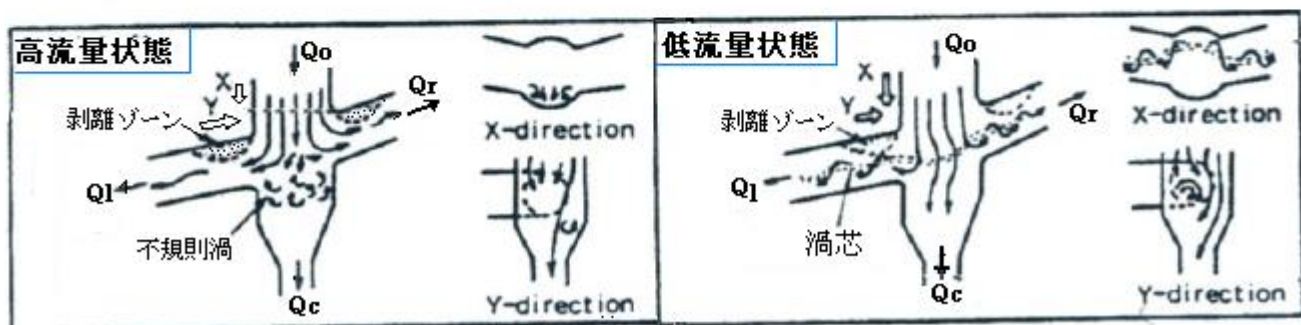


図7 気泡注入時の観察結果 ($Q_l:Q_c:Q_r=0.38:0.24:0.38$) [文献(2)抜粋]

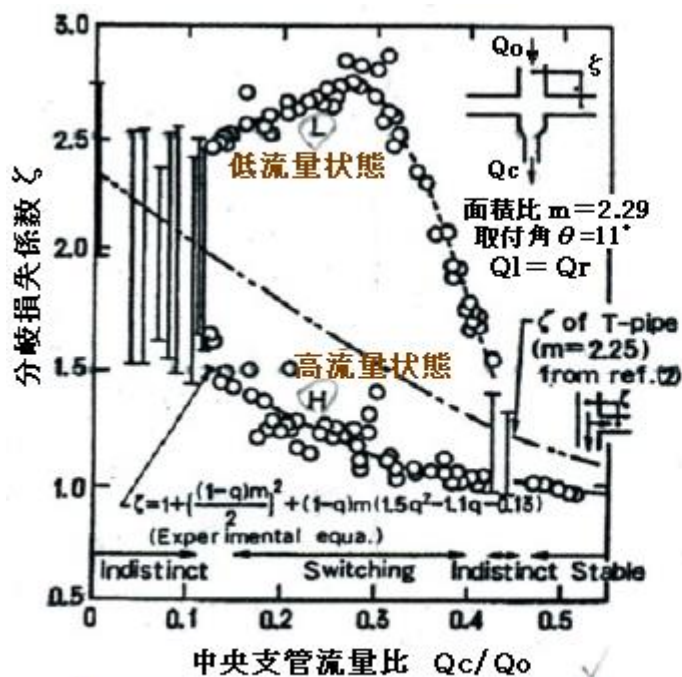


図3 分岐流量比の影響 (at $Q_l=Q_r$) [文献(3)抜粋]

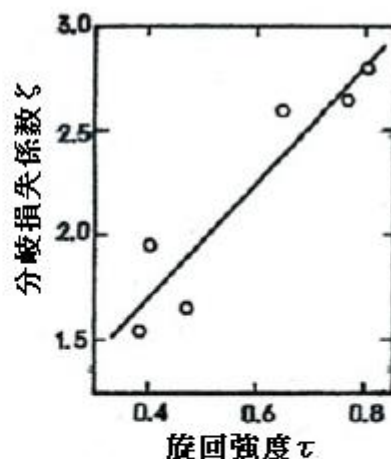


図4 旋回強度と分岐損失係数の関係 (低流量状態 L)

[文献(3)抜粋]

$$\text{旋回強度 } \tau = \frac{\text{Max. 周方向速度成分}}{\text{平均軸方向速度成分}}$$

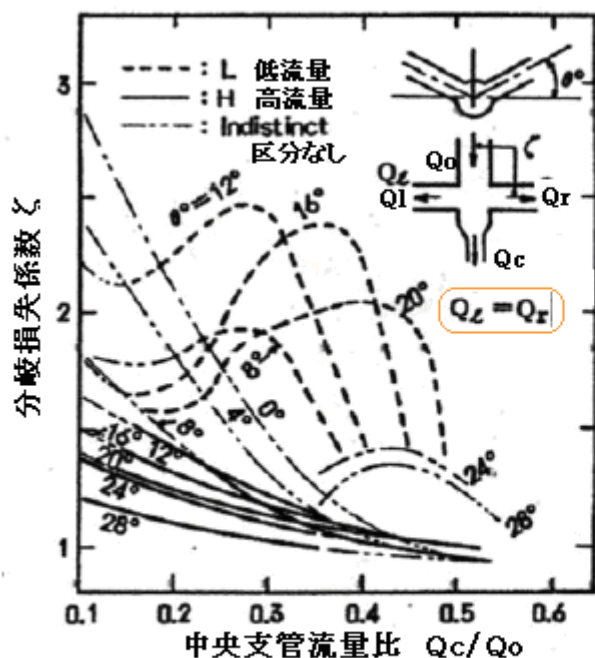


図8 左右支管の取付角の影響
[文献(3)抜粋]

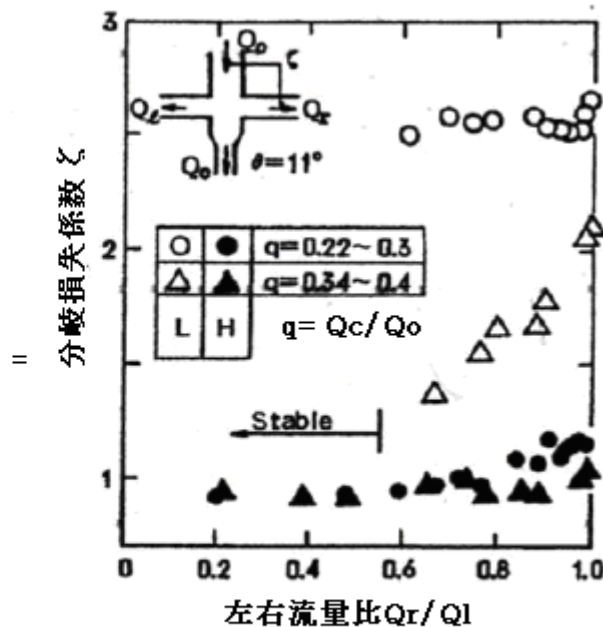


図5 左右分岐流量不均衡の影響
[文献(3)抜粋]

4. 通常の十字管流れと枝管に傾斜のついた十字管流れの比較

2項及び3項の違いは、傾斜がつくか否かの違いである。従って2つの結果はかなり似た所がある。以下、内容を粗く比較してみる。

- (1) 通常の十字管は本管下流への流量比が50%程度を割り込むと静圧変動が現われ、分岐損失係数の振れが次第に大きくなるが、この傾向は傾斜十字管でも同じである(図3参照)。
- (2) ただ、変動/振れの原因である2次流れについてはフローパターンが異なっている。通常の十字管流れでは渦糸が上下し旋回方向が反転していたが、傾斜十字管流れでは全流量が増減し渦糸は低流量でのみ派生している。しかし、これらの相違は、通常十字管流れ実験が定流量条件下であるのに対し、傾斜十字管流れ実験がブロー送風下であるために、生じたものと考えられる。多分、傾斜十字管流れでも、定流量試験下では通常十字管と同じように渦糸の上下が起きたのではないかと思われる。この傾斜十字管流れの挙動は、ポンプ/ブローで駆動される流れでは注目すべきで、他の配管構成要素の抵抗が少ない時、不規則でランダムな流動変動が常在することになる。
- (3) 流量比が下がってゆくと振れのMaxポイントが次第に上昇し、本管下流への流量比が10~30%で、その残り70~90%を両枝管に等量またはこれに近い配分で分配するときに、分岐損失係数が最大ピークになる。この傾向は、傾斜十字管でも同じであるが、傾斜が増すとピークが減退してゆく(図8、図5参照)。
- (4) 十字管における高い損失係数が、渦糸(旋回流)の介在に由来する所は、両者全く同じである。
- (5) 損失係数の傾向も両者、よく似ているが、傾斜があるためか(?)、傾斜十字管の方が低めになる傾向がある。

5. 設計用圧損係数の提案

文献(1)～(4)は流動現象の実験的観察に力点が置かれており圧力損失係数については余り整理されていない。設計用の損失係数としては、

Blevin テキスト：Trifurcation(3つ又分岐)の式

Miller テキスト：面積比 $m=1$ の場合のグラフ

がある。前者は一意的な流量比により損失係数を算定するもので、“対向する枝管の損失係数(ζ_{b1}, ζ_{b2})は互いの流量比に影響を受ける”という観察結果と合わない。後者はこれに比べて、図1 & 図16のデータと似た傾向を示す。この Miller の損失係数データを下記に示す。

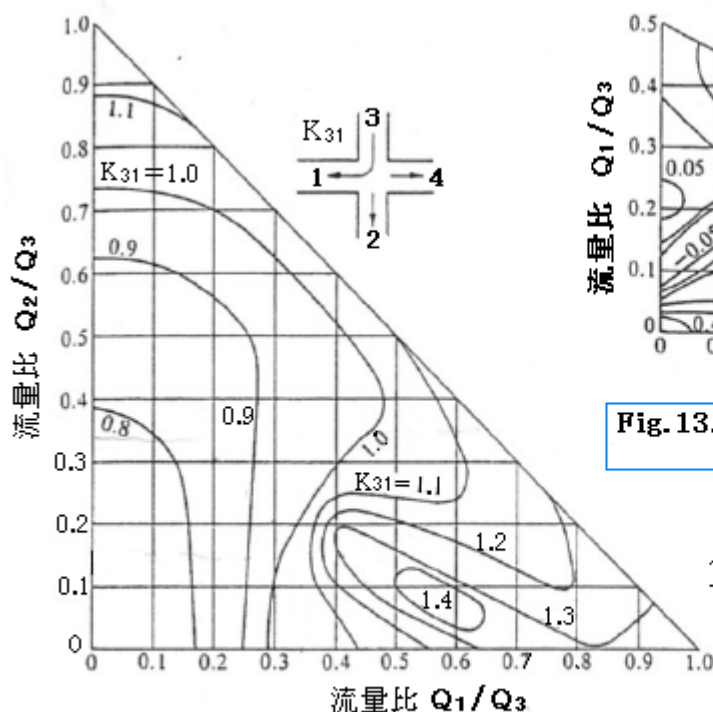


Fig. 13.30 Four-legged dividing junction loss coefficient k_{31}

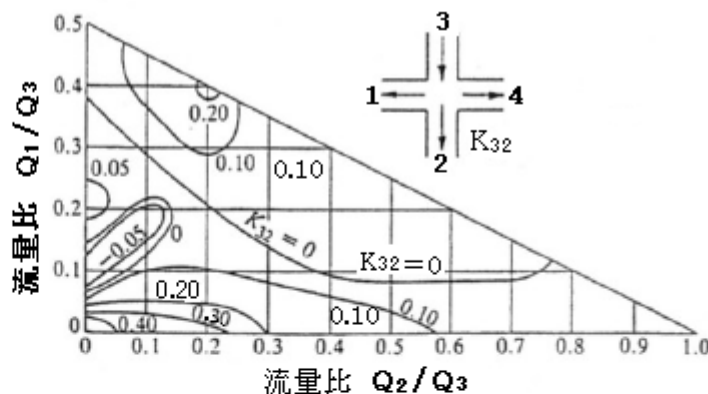


Fig. 13.31 Four-legged dividing junction loss coefficient K_{32}

但し 本管断面積 = 支管断面積 即ち $m=1$

このグラフでは、分岐損失係数 K_{31} は、本管下流への流量比 Q_2/Q_3 が 0.05～0.25 ぐらいでピークになっている。また左右分岐損失係数 $K_{31} >$ 中央分岐損失係数 K_{32} になっている。これらは粗々、図1や図16の損失データに符合している。ただ、図16の ζ_{b2} と K_{31} の値は差異がある。即ち

Q_4/Q_3	Q_1/Q_3	Q_2/Q_3	Fig.13.30 の K_{31}	図16の ζ_{b2}	ζ_{b2}/K_{31}
0.5	0.40	0.10	1.2	1.2	1.0
↓	0.35	0.15	1.1	1.62	1.47
↓	0.30	0.20	0.95	1.25	1.32
↓	0.25	0.25	0.92	0.85	0.92
↓	0.20	0.30	0.84	0.75	0.89

本管下流への流量比(Q_2/Q_3)が低い時は損失係数 ζ_{b2} は、Miller の損失係数 K_{31} より大きい。しかし (Q_2/Q_3)が高くなると、 ζ_{b2} は、Miller の損失係数 K_{31} と同程度か低い。

また Miller の K_{31} データは、同径の十字管($m=1$)のデータである。図1($m=2.7$)と図16($m=1$)を比べると、そのピークは 2.5 : 1.0 の割合になる(一般に分岐径が小さいと損失係数は大きくなる)。

従って、 $m > 1$ の小径分岐の損失係数に拡張するには、 K_{31} を何らかの形で補正する必要がある。
この場合、次の T 管分岐流れの式[FE-14-RP-006 に記載の式]を運用する。

$$K_{13} = 1 - \{0.34 + 2(r/d_3) + (0.5/m)\}(Q_3/Q_1) + \{0.5 - 2.4(r/d_3)\}m^2 + \{0.62 + 2.4(r/d_3)\}/m^2 \} (Q_3/Q_1)^2$$

簡略化のためコーナー r をゼロとし、 K_{13} , (Q_3/Q_1) を、本ケースに合わせ K_{31} , (Q_1/Q_3) とすれば、

$$K_{31} = 1 - \{0.34 + (0.5/m)\}(Q_1/Q_3) + \{0.5m^2 + 0.62/m^2\}(Q_1/Q_3)^2$$

$m=1$ の場合は、 $K_{31} = 1 - 0.84(Q_1/Q_3) + 1.12(Q_1/Q_3)^2$ 、これらの比をとると

$$\alpha = [1 - \{0.34 + (0.5/m)\}(Q_1/Q_3) + \{0.5m^2 + 0.62/m^2\}(Q_1/Q_3)^2] / \{1 - 0.84(Q_1/Q_3) + 1.12(Q_1/Q_3)^2\}$$

α は同径十字管に対する異形十字管の損失係数の割合である。

α 式で $m=2.7$ 、 $(Q_1/Q_3)=0.525(=0.7 \times 0.75)$ とすれば、 $\alpha = 1.7521/0.8677 = 2.0$ となる。図 1 と図 16 のピークの割合は $4.2/1.65 = 2.5$ 程度であるから、多分、 1.25α を用いればよい。

以上より、次の設計用の損失係数が提案される。なお ζ_{b2} は ζ_{b1} にチェンジしても可なので、ここでは ζ_{b1} で表記している。

$0.05 < Q_2/Q_3 \leq 0.25$: 左側分岐損失係数 $\zeta_{b1} = (1.25\alpha) \times (1.5K_{31}) = 1.875\alpha K_{31}$

$Q_2/Q_3 > 0.25$: 左側分岐損失係数 $\zeta_{b1} = (1.25\alpha) \times (1.0K_{31}) = 1.25\alpha K_{31}$

全て Q_2/Q_3 : 中央分岐損失係数 $\zeta_c = 1.25 \times 1.25K_{32} = 1.56K_{32}$

$$\text{ここで } \alpha = [1 - \{0.34 + (0.5/m)\}(Q_1/Q_3) + \{0.5m^2 + 0.62/m^2\}(Q_1/Q_3)^2] / \{1 - 0.84(Q_1/Q_3) + 1.12(Q_1/Q_3)^2\}$$

K_{31} , K_{32} = Fig.13.30, Fig.13.31 からの読み取り値

Q_1 , Q_2 , Q_3 = 各体積流量[Fig.13.30, Fig.13.31 の定義による]。

なお、右側分岐損失係数も、符合をチェンジして左側と同様に得られる。

なお、この圧損式は、**交叉部(クロッチ)のコーナーRがない場合に適用する。**

6. あとがき

十字管継手は、ねじ込み/差込の形で産業配管などに使われ、JIS にも規格寸法が与えられているがプロセス配管に使用される例は少ないと思われる。その理由は、クロッチ部の強度と製品欠陥に不安が残ることに加え、流体の流れ方に不安があるためと思われる。そのため食い違い T 管を使い割高になっていると思う。確かに十字管には旋回渦ができ流量/静圧変動がある。しかしそれは流れに障害をきたすほど強烈ではないし、流量比に依存するので回避可能である。ここで使用した情報[文献(1)(2)]はいずれもラボデータである。実機においてどうであるかはわからないが、文献(1)~(4)には共通したものがあり、ほぼ十字管流れの特性は把握されたとみていいと思う。ただ、損失係数データは十分ではない。特に異径分岐然り。今後とも、調査して精度の良いデータを探して行きたい。

なお十字管では旋回流の影響が支配的である。管路流れに及ぼす旋回流の影響については別途、TS で検討する必要がある。

引用文献：

- (1) 「分岐する流れ(5)―十字分岐流れの流動とその損失」 門,藤原,細川 (空気衛生工学第 55 巻 4 号)
- (2) 「十字分岐管を含む配管系の流動に関する研究 (第 1 報 特異現象とその流動状況)」 三浦,吉永ほか
[JSME 論文集(B編)53 巻 485 号(S62.1)]
- (3) 「十字分岐管を含む配管系の流動に関する研究 (第 2 報 流量変動に……)」 三浦,吉永ほか
[JSME 論文集(B編)53 巻 485 号(S63.7)]
- (4) 「分岐の研究 (十字管内流れの圧力損失と流動特性について)」 川上
[JSME 論文集(B編)53 巻 488 号(S62-4)]
- (5) 「Pressure pulsations in Flow through Branched Pipe.」 by D.W.Appel and Yun-Sheng Yu
[Proc. ASCE,92-HY6(1966-11) P179]