

【整番】FE-13-TM-004	【標題】流量分配・集合システムに関する情報(気液二相流の場合)
分類：流れ(流量分配)/種別：設計メモ	作成年月：H21.7/改訂：Ver0.0(21.7) 作成者：N.Miyamoto

全6枚

例えば図1のように、単一ラインから平行に並んだ設備(例えば熱交換器管束)に流量を分配するシステムでは、通常、各設備にできるだけ均一に流量分配されることが期待されている。その場合、分配される流体が気体ないし液体の単相流れであれば、下記のTSが有効である。

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

単相流の流量分配は、種々のバリエーションがあるものの、基本的にはシンプルな管路網問題として扱える。しかし分配される流体が混相流になると、相の分離や混合の問題があり単純ではない。そこで本TSでは混相流のうち、特に気液二相流に的を絞って、その流量分配に関する知見の整理を試みた。

内容的には、文献(1)の記述を基調にしている。また、図1aのコンデンサ設備の分配-集合システムを例にあげて記述しているが、流体が気液二相流である限り、本TSの内容は他の分配システム、集合システムあるいは分配-集合システムにもスライドして使用できる(念のため)。

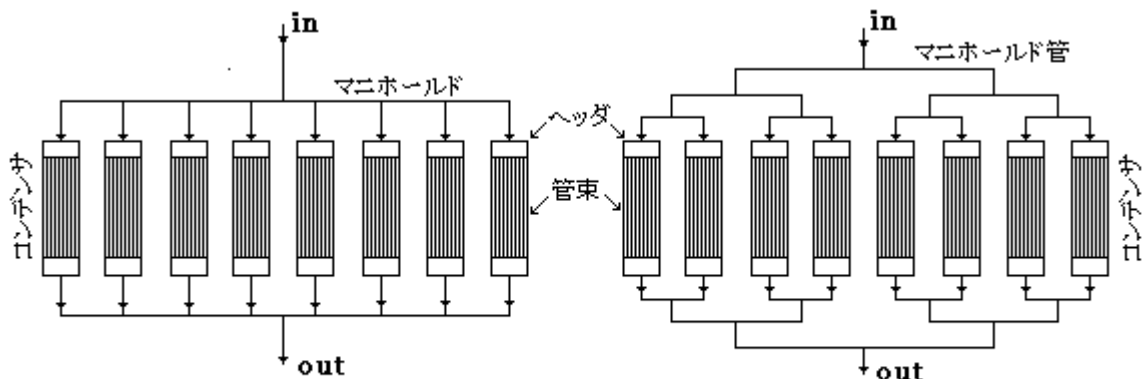


図1a 流配を考慮しないマニホールド配置 (好ましくない例)

図1b 流配を考慮したマニホールド配置 (好ましい例)

1. 二相流の流配の傾向と対策(全般)

(1) 単相流の場合、流量分配不良(いわゆる偏流)は、入口ライン-マニホールド-分岐ラインの流れ構造に起因している。通常、分配/集合マニホールドの静圧分布は流速変化に伴って図2のように勾配を持ちこれが配分の不均一をもたらす。何故なら、元圧であるマニホールド静圧が高いほどそこから流れ出る分岐流量は多く、マニホールドに沿った分岐流量は、静圧分布と同じような勾配を持って分布するからである。

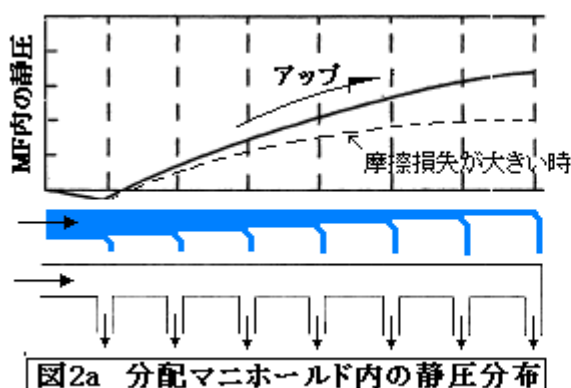


図2a 分配マニホールド内の静圧分布

文献(5)より

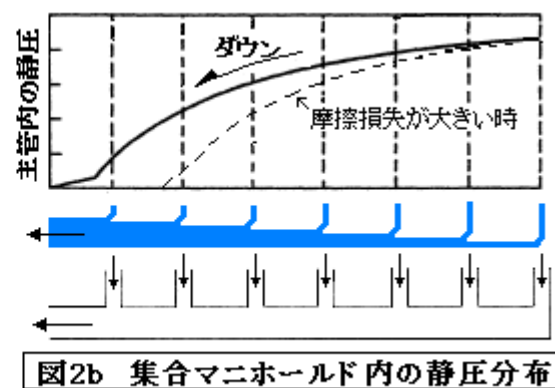


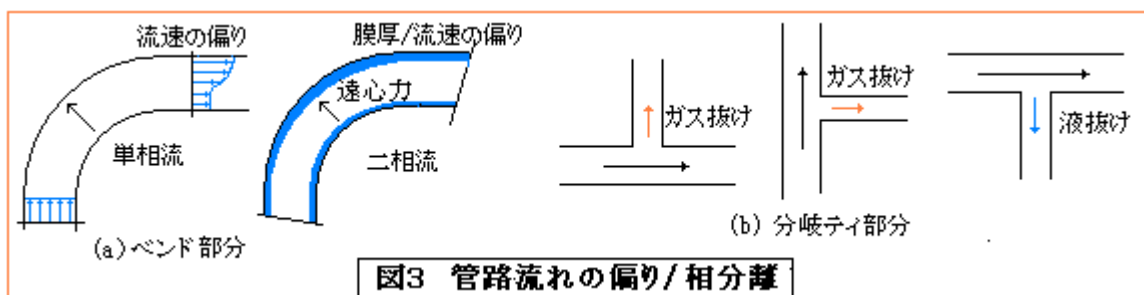
図2b 集合マニホールド内の静圧分布

文献(5)より

二相流の場合も、基本的にこの流れ構造は変わらない。しかし通常、二相流は完全に均質混合した状態にあることは少なく、

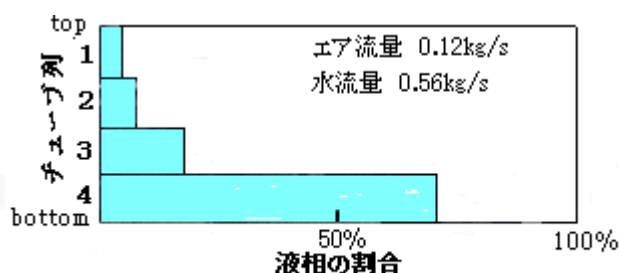
- ・重力場において、**気相が浮遊離脱し液相が沈降離脱して相分離**する傾向がある。
- ・遠心力や旋回によって**重い液相が流路の外縁に移動し偏流を強める傾向**がある。

これらの傾向は管の曲がりや分岐部に典型的な形で現れる⁽⁴⁾。図3にこれを示す。(a)のベンドに生じる偏流は固有のもので、単相流では外周に流量(流速)が偏る。2相流では更に遠心力で液相が外周に押しやられ単相流より露骨な形で偏流が起きると思われる。(b)の分岐ティに生じる偏流は重力によるもの。分岐が鉛直上方あるいはサイドにあるとガスやベーパーは分岐側に抜け、分岐が鉛直下にあると液相が分岐側に抜ける傾向がある⁽⁴⁾。こうして分岐点を境にクオリティが変化する(実質的にこれは偏流である)。実際にはフローパターン(気泡/層状/スラグ/環状/噴霧流)も絡んでくるのもっと複雑なのかも知れない。これらの現象については文献(5)に詳しく報告されている。



マニホールドの入口ラインには必ずベンドがある。またマニホールドは多連分岐管である。従ってその形状によっては、マニホールドが気液分離器のようになって、著しい配分不良が起きる恐れがある。

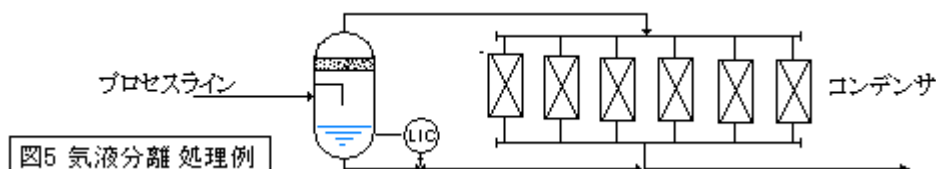
更にマニホールドから熱交のヘッダー(水室)に入ると、流れは膨張しここでも顕著な相分離が起きる可能性がある。図1aでは熱交は整形であるが、実際は水平置きが多い。その場合、液相はボトムに抜けてボトム付近のチューブ列に流れ込むことになる。この例(テスト結果)を下図に示す。



文献(1)より

(2) 単相流にも増して、二相流では配分不良の回避は難しい。単相流では、図1aのようなシステムでも配分不良が許容内に収まる可能性があった。しかし二相流では可能性は殆どない。文献(1)の文言を借りれば、配管/マニホールド/ヘッダ(特にヘッダ)で起きる二相流の配分不良はどんな方法をとって避けられない。設計者(特にプロセス設計者)はその辺りをよく認識した上で、

- ある程度の配分不良を受容できるように平行設備を計画する(例えば伝熱面積を増やす)か、
- 平行設備の前に気液分離器を設け⁽³⁾、例えば液相をバイパスさせて気相のみを処理する



という選択になる。**A**については、配分不良の度を定量化する必要があるが、マニホールドやヘッダで起きる分離現象やそのメカニズムの追究は今のところ十分ではないようなので必然、経験則に拠らざるを得ないと思う。**B**は一見、設備費の増加にみえるが、マニホールドやヘッダ構造の複雑化などを考えれば、結局、得になるのかもしれない。

Aの場合、何の対策も行わず成り行きに任せることはまずあり得ない。配分不良の緩和策については、次項で議論する。ただ、どこまでやるかということになれば、結局、前述のように経験則に従わざるを得ないが、経験則のデータはざらにはない。強いて定量的に対処しようと思うなら、

①分流/合流構造が本来もっている配分偏差+②ライン中の相分離に起因する配分偏差に分離する。①について2相流ベースの流配計算によって推理すればよい。多分計算は単相流より厄介になるが、可能である。二相流管路網の計算ソフトがあればより確実と思う。②は、事例などにに基づき安全側にジャッジすることになる(①と同量に見込んだらどうだろう?)。

- (3) 二相流の配分不良の度合いは、例えば配分不良が熱交性能に及ぼす影響によってもある程度、憶測できるのかも知れない。これに関して、末尾に補足事項を追記したので参照のこと。

2. 二相流における配分不良の緩和策

- (1) まずマニホールド廻りの配置/形状について。前述のように図 1a の配置は二相流には不適である。流れはマニホールド内を移動しつつ逐次、分流してゆくが、その際、図 3b のようなパターンになって液分が抜け、各分岐流量がフリーになってしまう(自制不能)。それを回避するためには、

ヘッダ入口に流量制御弁を設ける or 図 3b のパターンを回避する

ことが考えられる。しかし二相流の流量制御は総じてコスト高になるし、クオリティ(気体の質量分率)の違いを熱交チューブに持ち込むことになり問題が残る。一方、図 3b のパターン回避は、図 1b のようなトーナメント方式で可能である。ただ、ルーズなトーメントは排除すべき。原則的に、

- (a) 多重化された2パス方式をとる、
- (b) 形状的に連続した対称分岐構造にする、
- (c) 配分不良を誘起することのない管構造にする、
- (d) 分配システムと集合システムは相似形にする

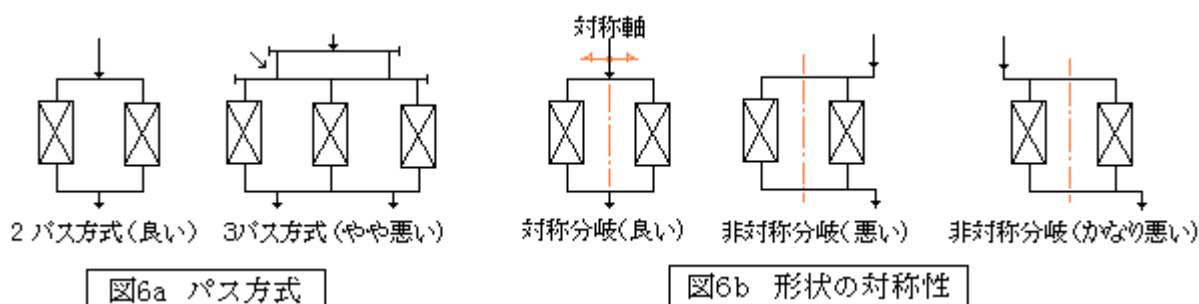
ことが望ましい。

まず(a)について。トーナメント方式は、元来、2者択一の構造でいわば多重化された2パス方式である。この方式は、前述のように図 3b のような離脱パターンがない。また、(d)のようにパラレル設備出口側の集合マニホールドも同じトーナメント方式にするとともに、(b)のように形状的な対称性をキープするなら、各流路の流れの抵抗を容易に同一に保つことができる。

この2パス方式では、パラレル設備(ここでは熱交管束)の設置数は、2の整数上即ち2,4,8,16,...になる。しかし、設備によっては $[2^N]$ の設置数がキープできないことがある。その場合、図 6a のような3パスも考えられるが、対称に分岐していないので均分にならない懸念が残る。慎重に圧損チェックされるなら3パス方式も不可ではないが、一応2パス方式を優先させるべきであろう。

次に(b)について。対称分岐とは、管入口の芯あるいは出口の芯を中心にして左右に分岐をとることで

ある。分流に伴う流量偏差は最小に保たれ、左右の流れ抵抗は同じに保たれる。またこれを繰り返すことでパラレル設備の流量偏差は最小になる。図6bを参照のこと。

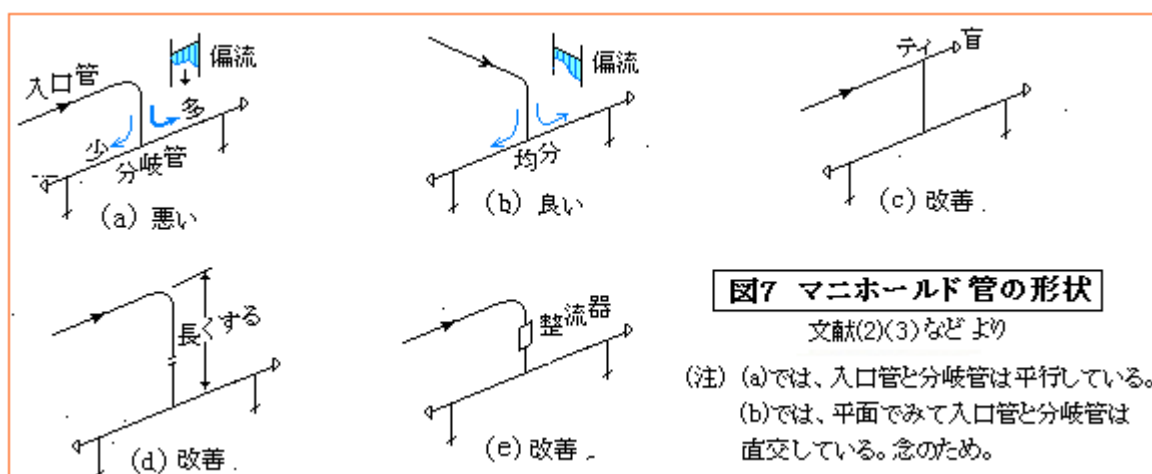


次に(c)について。マニホールド内の管断面の偏流(流速の偏寄り)があると次の分岐で配分不良を起こす恐れがある。例えば図7(a)では入口側にベンドがあって、図3aのように曲がり部分の外周に偏流が起きてこれが右側の分岐ラインに流れて流量偏差を生じる。しかし図7(b)では、曲がり外周の偏流は左右に等分される筈で、流量偏差は発生しにくい。ただ、どうしても配管を変える訳にはいかず偏流が避けられない事情があれば、以下のような対処が考えられる。

- ①偏流程度を改善するためベンドをティ+キャップに変える [図7の(c)]
- ②気液の混合を期待して直管部分を長くする [図7の(d)]
- ③後流の直管部に整流器(多孔式?)を挿入する [図7の(e)]

①は文献(2)で推奨されているが、曲管からティ分岐に変えも偏流は消えないだろうから、②③と組み合わせる必要があると思う。②は結構な距離(15D以上?)が必要になるだろうから現実性は薄い(?)。

また③について文献(1)では、ベンドの有無とは別に分岐直前に必ず設置することを勧めている。二相流の整流器については脚注Aの情報がある。曲がり部分に整流ベーンを挿入しても同じ効果が得られるかも知れない。いずれも圧損が大きくなると思うが、検討するだけの価値はありそうだ。



最後に(d)について。基本的に、分配側と集合側のどちらかが二相流になるならば、いずれの側も相似したトーナメント方式の配置にするべきである。何故ならパラレル設備の通過流量は、分配側～集合側の差圧分布に依存するので、どちらの静圧分布も均一分布に近づけるのがベターであるからである。

- (2) なお、以上ではマニホールド形状に拠る緩和策を示した。これ以外に、分配直前に二相流を完全に均質化して、図1aのように単純に配分する発想がある。その場合、高い差圧を与えてオリフィス様の絞り部分を通させて均質化を行う。既に実用化されているのかもしれないが、残念ながら手元に情報は無い。

(3) 次に熱交ヘッダについて。水平置き熱交のヘッダ内の気液分離は厄介である。前述のように液分がボトムに抜けて下部の管束を流れ、熱交性能に影響を与える(脚注 B 参照)。

これを緩和するには、**分散板(deflector)**を取り付けて液相をヘッダ内に散らすことが考えられる。これについてはいろんなアイデアがあるが、まだ確定したものはないらしい。文献(1)は、仮に考案した分散板がうまくいかなくとも、気液分離が進んで配分不良が更に悪化することはないだろうとしている。この方式がまだアイデア段階に留まっていることを暗示する。

***** 脚 注 *****

A. 二相流を均質化する方法：

スラグ流を均質化して気泡流に変換する方法としては、**多孔オリフィス板**あるいは**多孔質板**を挿入する方法が一般的ではないかと思う。前者は多孔板を複数枚、管に挿入したもので Hz 納入の設備に使用実績がある⁽⁶⁾。後者は文献(7)に報告されている。ABS 樹脂製焼結体/青銅製焼結体が有効とされている。

B. 相分離に起因する配分不良が、熱性能に及ぼす影響：

プロセスフローの配分不良(特にヘッダ内)は避け難く辛抱する他ないが、熱交性能への影響をみるため[完全配分+完全気液分離]を想定して、一連のコンデンサモデルに関するスタディが行われた。その結果、

流体物性や気液の割合にも由るが、相分離によって約 25%(?)、伝熱量が減少することがわかった(典型的な結果を Fig.3 に示す)。またこれらのスタディで次のようなこともわかった。

ベーパーから分離した液がチューブを通る時に**過冷却**されるが、これが出口側ヘッダ内で凝縮遅れのベーパーと直接接触して凝縮しはじめ、その遅れによって**熱交下流側が二相流**になる。また、相分離によって、均質配分で予想されるものを上回る**圧力降下**が発生する(Fig. 4 参照)

以上は机上のシミュレーションによっている。実際の相分離は完全な均質状態と分離状態の間にある(幾分、完全分離状態寄り)と思われる。従って、以上の結果は安全側に運用できる。

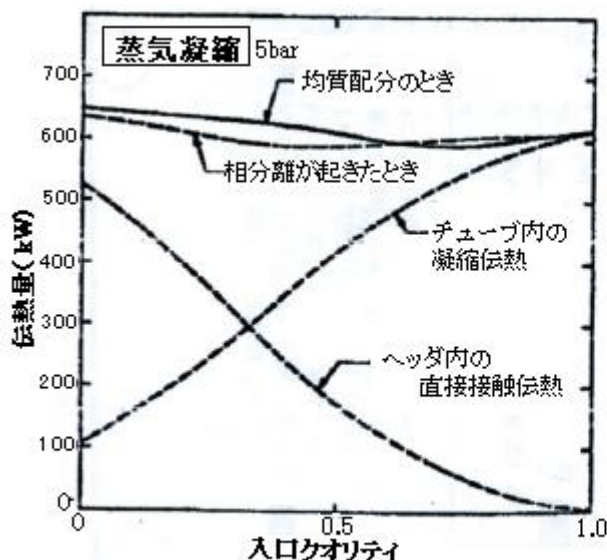


Fig.3 入口クオリティと伝熱量

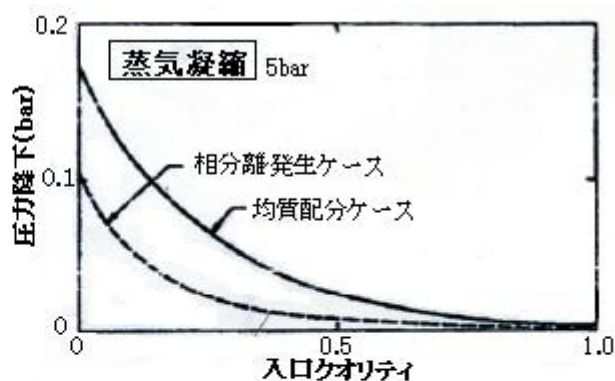


Fig.4 入口クオリティと圧力降下

引用文献：

- (1) HTFS AP8 : Header flow Distribution(Two-phase) by J. R. Henry
- (2) 二相流体の流れの配分配管法 (講習会逸文)
- (3) 「Sizing Piping for Process Plant」 by L. L. Simpson (Chemical Engineering June 17, 1968)
- (4) HTFS DR28 Part 8 Prediction of two-phase pressure drop in pipe fitting
- (5) NEL SR92 : Effect of two-phase mal-distribution on the performance of an air-cooled condenser
Henry, J. R. (1982)
- (6) 「ナフサ(液)/H₂ ガス混相流体の分散板の設計」 Hz 研機 柳 (H7.10)
- (7) 「垂直管内気液二相スラグ流の気泡流化装置の開発」 坂口,赤対ら JSME B 編 Vol.87-0828B(S63.3)