抵抗分岐管による管内脈動低減*

神 田 哲 郎^{*1}

Attenuation of the Pulsation by Side-Branch Pipes with Large Resistance

Tetsuo KANDA

In a piping system including a reciprocating compressor, pulsating flow would be generated by intermittent injection from the reciprocating compressor. When the pulsating flow is in a condition of resonance, it would naturally result in an undesirable variety of problems. In this paper, a new method for the attenuation of the pulsation is reported. The new method consists of side-branch pipes in which fibrous matters or many orifices having large openings are packed. The side branch pipes have large and uniform resistance against the pulsation and increase the damping of the piping system. The new method shows good performance and is effective even when the operating conditions change. It does not increase the power consumption of the compressors because it has not resistance in the path of main flow.

Key Words: Fluid Vibration, Reciprocating Compressor, Pressure Pulsation, Side-Branch Pipe, Damping

1. 緒 言

往復動圧縮機内のピストンの動きにともなう弁の開閉による気体の間欠的供給が原因となって、往復動圧縮機に連なる配管系内の気体には圧力および流量の変動(以下、管内脈動と呼ぶ)が発生し、配管系内を脈動波として伝ばする。もし配管系内の気体の固有周波数と往復動圧縮機によって与えられる加振周波数が近いとき、共振となって管内脈動が極めて大きくなる。管内脈動の発生原因は往復動圧縮機が一般的であるが、そのほかに遠心圧縮機や流体の流れによって発生する渦などがある。管内脈動が大きいとき次のようなトラブルが発生する。

(1) 管内脈動が配管を振動させ、配管またはサポートを破損させる。またコンプレッサ弁の早期損傷となる。

(2) 往復動圧縮機のエネルギー効率が低下する。共振状態では往復動圧縮機の直後の配管の脈動圧力が高くなったときに弁が開き、気体が配管に供給されるので無駄なエネルギーが消費される。

(3) 流量計、圧力計の指示が不正確になる。

これらのトラブルを防止するため管内脈動を小さくする必要がある。そのため従来からおこなわれている方法として次のようなものがある。

(1) 配管の長さ、配管の太きなどを変えて配管系の気体の固有周波数と往復動圧縮機による加振周波数が一致しないようにする。

(2) 配管系にオリフィスプレートなどの抵抗を入れて配管系のダンピングを大きくする。

(3) 大きな空気タンクを設置する。

(4) 4分の1の波長分岐管を設置する。

(5) ヘルムホルツ共鳴器を設置する。

しかし、(1)、(4)、(5)の方法はある特定の加振周波数に対しては効果的であるが、加振周波数が変化したり、脈動波の伝ば速度(音速)が気体の成分、温度により変化すると効果はなくなってしまう欠点を有する。また(2)の方法は効果的であり、一般によく使用される方法であるが、配管の主流路に抵抗を設置することは同時に平均流に対しても抵抗となり往復動圧縮機の消費動力を増大させる。また(3)の方法は低周波の脈動低減には極めて大きなタンクが必要であり高価となる欠点を有する。以上のように従来の脈動低減法はいずれもなんらかの欠点を有している。

* 昭和63年11月26日 関西支部第248回講演会において講演、原稿受付 昭和63年2月24日。

*¹ 正員、千代田化工建設(株) (〒221 横浜市神奈川区守屋町3-13)。

本報では配管系に分岐管を設置し、分岐管内に多数のオリフィスプレート、多孔板、または充てん物などを一様に入れ分岐管の大きなダンピングにより配管系全体のダンピングを大きくし、往復動圧縮機からの平均流に対しては全く抵抗を増加させることなしに条件が変化しても効果的に管内脈動を低減させることが可能な方法（以下、抵抗分岐管と呼ぶ）について報告をおこなう。

2. 抵抗分岐管の脈動低減原理

図1に示したように往復動圧縮機を含む配管系の1点に先端が閉じた分岐管を設置し、その分岐管内に1枚当たりの流体に対する抵抗が小さいオリフィスプレート、多孔板、または空げき率の大きい充てん物などの抵抗体を多数、均一に入れた場合を抵抗分岐管の基本形とし、その脈動低減の原理について説明する。

往復動圧縮機から発生した脈動波は配管系と伝ばしていくが、抵抗分岐管の分岐部で脈動波の一部は抵抗分岐管内に入ってゆき抵抗体によって脈動波のエネルギーを消費する。抵抗分岐管に入っていない残りの脈動波は配管系に伝ばしていくが配管系のダンピングは小さいので脈動波のエネルギーは消費されずに配管系内で反射して発生源の方向へ戻ってくる。再び抵抗分岐管の分岐部で一部が抵抗分岐管内へ伝ばされエネルギーが消費される。このように往復動圧縮機から発生した脈動波は配管系を往復しながら少しずつ抵抗分岐管内に伝ばしエネルギーが消費されるので脈動圧力、脈動流量が極めて大きくなることはない。抵抗分岐管を設置しても配管系の主流路には抵抗体は付加されないので平均流に対する抵抗増加なしに配管系全体としての脈動波に対するダンピングを増加させることができ、共振を防止することができる。

抵抗分岐管としてはできるだけ脈動波のエネルギーを受け入れ、受け入れたエネルギーはすべて消費し、再び主配管系に戻らないような構造が望ましく、極め

て太い分岐管で無限に長い無反射管が理想的である。しかしながら、現実の分岐管は太さ、長さとも制限されるので抵抗分岐管内の抵抗は適当なものを選ばなければならない。すなわちあまり大きな抵抗値の抵抗の場合は抵抗分岐管がつまった状態となり脈動波を受け入れず、またあまり小さな抵抗値の抵抗の場合には脈動波が減衰されずに抵抗分岐管の先端で反射して再び主配管系に伝ばされる。また抵抗分岐管全体の抵抗値は最適であっても抵抗体が1箇所に集中して置かれている場合には脈動波は集中抵抗で反射して減衰されずに再び主配管系に伝ばされるので、抵抗体は抵抗分岐管全体に様に分布している必要がある。

抵抗分岐管を分岐する配管系の位置については、脈動波が共振して定在波となった場合の圧力脈動の節の部分から分岐した場合には脈動波は抵抗分岐管に伝ばされないのので効果がなくなる。したがって脈動圧力が零（節）であることをさけるためには複数の抵抗分岐管を設置するか、または図2のように抵抗バイパス管を設置する方法が考えられる。

3. 伝達マトリックスによる計算

3.1 主な記号

- A : 配管の断面積
- c : 音速（脈動波の伝ば速度）
- f : 周波数
- K : 気体の体積弾性率
- l : 配管の長さ
- L : 分岐管の長さ
- P : 圧力
- p : 脈動圧力（圧力の変動成分）
- Q : 体積流量
- q : 脈動流量（体積流量の変動成分）
- R_f : 配管の管摩擦などによる等価線形抵抗係数
- t : 時間
- x : 管軸方向座標
- Z : インピーダンス
- ρ : 気体の密度

図1 抵抗分岐管の基本形

図2 抵抗バイパス管

ω : 流量変動源の角周波数

λ : 脈動波の波長

3・2 伝達マトリックスの基礎式 管路に沿って断面積および物性値が一定な一次元流れに対する運動方程式と連続の式とは次のように表される⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \rho R_f u \quad \cdots (1)$$

$$\frac{A}{K} \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\partial(Au)}{\partial x} \quad \cdots (2)$$

式(1)の右辺第2項は等価線形抵抗係数 R_f を用いて線形化されている。等価線形抵抗係数 R_f は管摩擦抵抗などのほかに一様に分布した抵抗体などの抵抗係数を含み流速の関数である。

いま管路内の圧力 p , 流量 q が脈動数 ω で正弦状の振動をしているとして

$$\left. \begin{aligned} p &= P \exp(i\omega t) \\ q &= Q \exp(i\omega t) \end{aligned} \right\} \quad \cdots (3)$$

と複素表示する。

式(1), (2)は次式となる。

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\rho}{A}(i\omega + R_f)Q \quad \cdots (4)$$

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{A}{K}i\omega P \quad \cdots (5)$$

したがって

$$\frac{d^2 Q}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \alpha^2 Q = 0 \quad \cdots (6)$$

ただし

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{R_f l}{\omega}}$$

式(6)を下記の条件によって解く。

$$x = -l \text{ において } P = P_A, Q = Q_A$$

$$x = 0 \text{ において } P = P_B, Q = Q_B$$

解は式(7), (8)となる。

$$\begin{aligned} P_A &= \cos\left(\alpha \frac{\omega l}{c}\right) \cdot P_B \\ &+ \frac{\rho c}{A} \alpha i \sin\left(\alpha \frac{\omega l}{c}\right) \cdot Q_B \quad \cdots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_A &= \frac{A}{\rho c} \cdot \frac{i}{\alpha} \sin\left(\alpha \frac{\omega l}{c}\right) \cdot P_B \\ &+ \cos\left(\alpha \frac{\omega l}{c}\right) \cdot Q_B \quad \cdots (8) \end{aligned}$$

3・3 抵抗分岐管のインピーダンス 抵抗分岐管の先端は閉じているから流量 Q_B は零であり, 抵抗分岐管の分岐部での圧力 P_A , 流量 Q_A はそれぞれ

$$P_A = \cos\left(\alpha \frac{\omega l}{c}\right) P_B \quad \cdots (9)$$

$$Q_A = \frac{A}{\rho c} \cdot \frac{i}{\alpha} \sin\left(\alpha \frac{\omega l}{c}\right) P_B \quad \cdots (10)$$

で表され, 抵抗分岐管のインピーダンス Z_A は式(11)で表される。

$$Z_A = \frac{P_A}{Q_A} = \frac{\rho c}{A} \cdot \frac{\alpha}{i} \cdot \frac{1}{\tan\left(\alpha \frac{\omega l}{c}\right)} \quad \cdots (11)$$

式(11)を無次元化し, 紡対値を求める。

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{Z^*} \right| &= \left| \frac{\rho c}{A} \cdot \frac{1}{Z_A} \right| \\ &= 1 / \sqrt{1 - \frac{R^*}{\omega^*} i} \cdot \tan\left(\sqrt{1 - \frac{R^*}{\omega^*} i} \cdot \omega^*\right) \quad \cdots (12) \end{aligned}$$

$$\text{ただし } \omega^* = \frac{\omega l}{c}$$

$$R^* = \frac{R_f l}{c}$$

R^* をパラメータとして ω^* と $|Z^*|$ との関係を計算すると図3となる。図3によれば無次元抵抗係数 R^* に関しては R^* が大きすぎると全体的にインピーダンス $|Z^*|$ が大きくなり脈動波が抵抗分岐管内に伝ばされない状態で効果が小さく, また R^* が小さすぎるとピーク値が大きな値となるので, あらゆる周波数に対して $|Z^*|$ の大きな値が存在しないためには $R^* = 3.0$ が最適であることを示している。抵抗分岐管の長さに関しては長いほど効果的であるが図3によると無次元角周波数 ω^* の値が0.15以下では R^* の値によらず常に $|Z^*|$ の値が大きくなり効果的ではない。すなわち抵抗分岐管の長さは脈動波の波長の15%以上が必要である。なお理想的な無反射管では $|Z^*|$ の値は1.0となる。

3・4 抵抗分岐管の取付け位置 抵抗分岐管を取付けた場合でも常にすべての周波数において共振が防止されるわけではなく, 共振が発生する場合もあり得る。この点について検討する。図4に示したような位置にインピーダンスが Z_b である抵抗分岐管を取付けた場合を考える。抵抗分岐管取付位置以後の配管系のインピーダンスを Z_c とする。脈動源の圧力 P_0 および体積流量 Q_0 は分岐管取付位置での圧力 P および体積流量 Q とその間の伝達マトリックスによって式(13)で表される。また抵抗分岐管取付位置でのインピーダンスは式(14)となる。

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad \cdots (13)$$

$$\frac{Q}{P} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} \quad \cdots (14)$$

伝達マトリックスは例えば直管の場合には

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \omega^* & \frac{\rho c}{A} \alpha i \sin \alpha \omega^* \\ \frac{A}{\rho c} \cdot \frac{i}{\alpha} \sin \alpha \omega^* & \cos \alpha \omega^* \end{bmatrix} \quad \cdots (15)$$

である。

式(13), (14)より式(16)が得られる。

$$\frac{P_0}{Q_0} = \frac{c_{11}Z_c + c_{12}\left(\frac{Z_c}{Z_b} + 1\right)}{c_{21}Z_c + c_{22}\left(\frac{Z_c}{Z_b} + 1\right)} \quad (16)$$

Q_0 はコンプレッサの脈動源として一定であるとして共振によって P_0 が発散するための条件を求める。配管系の主流路を形成する M および Z_c の抵抗成分は極めて小さいこと、また抵抗分岐管の Z_b の抵抗成分は大きく、周波数によってあまり変化しないことを考慮すると式(16)の分母が零となるための条件は次の二つが同時に成立することである。

$$Z_c = 0 \text{ および } c_{22} = 0 \quad (17)$$

コンプレッサによる加振周波数を f_0 とし、 $Z_c = 0$ および $c_{22} = 0$ となる周波数をそれぞれ f_1, f_2 とする。 f_0 はコンプレッサの回転数による基本周波数の他の二次、三次、…の高調波が多数存在し、 f_1, f_2 も固有周波数として多数存在する。したがって式(17)が成立し、共振と言える状態は式(18), (19)が同時に成り立つときである。

図3 抵抗分岐管のインピーダンス

図4 抵抗分岐管の取付位置

$$f_1 \approx f_0 \quad (18)$$

$$f_2 \approx f_0 \quad (19)$$

式(18), (19)が同時に成立する状態とは抵抗分岐管の取付位置において脈動定在波が節（脈動圧力が零）となっている状態である。

一方、抵抗分岐管の設置がない場合にはコンプレッサの加振周波数 f_0 が配管系の固有周波数 f に近い場合すなわち、 $f \approx f_0$ で共振することを考えれば抵抗分岐管の設置によって同時に満たさなければならない条件が増えたことになる。さらに共振を起こりにくくするためには抵抗分岐管を複数本設置するか、抵抗バイパス管（図2）の設置が効果的である。

4. 実験による効果の検証

抵抗分岐管の効果を実証するために小形の空気用往復動圧縮機を使って配管内の脈動圧力を測定した。

実験装置の概要を図5に示す。

往復動圧縮機はシリンダ内径 75 mm, ストローク 50 mm であり弁を取り外してあるため平均流はなく正弦波の流量変動だけを発生させる。この往復動圧縮機に外径 60 mm, 長さ 20.7 m で終端が開口の管を配管系として設置し、抵抗分岐管は往復動圧縮機から 0.4 m の位置に設置した。抵抗分岐管は同じく外径 60 mm で長さは 8.0 m で終端は閉である。抵抗分岐管内にはプラスチックの充てん物が均一に充てんされている。充てん物に対する平均流の抵抗は平均流速が 2.3 m/s で 200 Pa/m, 6.3 m/s で 1000 Pa/m であり、この流速範囲では流速の 1.6 乗に比例する。

往復動圧縮機の回転数は 120 rpm (2.0 Hz) から 1750 rpm (29 Hz) まで変化させた。脈動圧力は配管系の 10 箇所に設けられた圧力センサが検出し、実効値として処理した。

図6は実験の結果を示したもので横軸に往復動圧縮機の回転数を、縦軸に脈動圧力の実効値の各計測点の最高値をとっている。図6の実線は分岐管内に抵抗体が入っていない状態でダンピングが小さいため大きな

図5 実験装置

図 6 抵抗分岐管の効果

ピーク値があらわれているが、分岐管内には均一な抵抗を設けた場合には共振点においてもいちじるしい脈動圧力の低下が観察される。

5. 結 言

配管系の 1 点から分岐管を分岐し、分岐管に様に抵抗体を充てんし、抵抗体の抵抗係数を適当に選んだ抵抗分岐管は配管系の平均流に対する抵抗を増大させることなしに配管系の脈動に対するダンピングを大きくすることができ管内脈動を低減させることが可能であることがわかった。抵抗分岐管としては配管系と同程度の太さで、波長の 15 % 程度の長さで十分であり、

大きな空気タンクを設置するよりも安価であり、運転条件が変化して気柱の固有周波数が変わっても効果は変わらない。

抵抗分岐管が 1 本の場合には分岐された点の脈動圧力が極めて小さい場合に抵抗分岐管の効果は小さいが、これを防ぐためには複数の抵抗分岐管を設置するか、または抵抗バイパス管を設置すればよい。

文 献

- (1) 葉山・ほか 2 名, 機論, 42-364 (昭 51), 3825.
- (2) 葉山・ほか 2 名, 機論, 45-392, C (昭 54), 422.
- (3) 葉山・毛利, 機論, 49-439, C (昭 58), 351.
- (4) 松田・葉山, 機論, 51-463, C (昭 60), 515.

討 論

〔質問〕 金子 成 彦 (東京大学工学部)

(1) 緒言の中の『往復動圧縮機のエネルギー効率』の定義についてご説明願いたい。

(2) 本文中に、抵抗分岐管に充てんされる抵抗体は一様に分布している必要があるとの説明があるが、その理由についてお伺いしたい。また、必ずしも一様である必要はないのではないか。最適分布のようなものは存在しないだろうか。

(3) 複数の抵抗分岐管と図 2 のようなバイパス管が同じ効果を与える理由についてお教願いたい。

(4) $R^*=3.0$ を与えてくれる抵抗体の具体的な設計法についてお教願いたい。

〔回答〕 (1) エネルギー効率という言葉は適切ではなかった。

ここでは Actual Volumetric Efficiency を指す。

(2) 集中抵抗が望ましくないのは本文に述べたと

おりである。また例えば閉端分岐管の端部では脈動流量が零であるので抵抗体は役に立たないことを考えれば一様な分布が必ずしも最適とは言えないがあらゆる周波数の脈動波を対象とすると一様な分布にせざるを得ない。特定の周波数の脈動波を特に減衰させたい場合には最適分布が存在するかもしれない。

(3) 効果については同じではない。例えば同じ長さのバイパス管では分岐管に相当する長さが短くなり低減できる脈動波の最小周波数が高くなる。しかしガスの滞留が少ないなどの利点も加味して使いわけが必要がある。

(4) R^* は等価線形抵抗係数を含んでいるので脈動流速を知らなければならない。まず平均流による抵抗係数を計測し、脈動流による抵抗係数と同じと仮定する。計算においては $R^*=3$ として抵抗分岐管内の数点の脈動流速を計算する。この脈動流速の平均値に相

当する平均流において等価線形抵抗係数を求め $R^*=3$ となるような抵抗を選ぶ。ダンピングが小さい場合のピーク値は等価線形抵抗係数の値に大きく依存する

が、全体のダンピングが大きい場合は R^* の値が最適値ではなくてもピーク値に大きな変化はない。