U.D.C. 532. 595. 2:533. 21]. 001. 2:681. 322. 06 621. 644. 2. 02:621. 512

圧縮機配管系における圧力脈動の計算機プログラムの開発

Development of Computer Program for Gas Pulsation Analysis in Reciprocating Compressor Piping System

In simulating reciprocating compressor piping systems analog computers have been used almost exclusively. In recent years, however, digital computers are coming into wider use increasingly because of their simple input information, direct printing-out of results, easy operation, etc. This paper deals with the development of calculation programs by digital computers. The authors' method of programmed digital computation is based on the transfer matrices obtained from the solution of the wave equation and harmonics expanded in Fourier series from exciting pulsation of compressor gas flow. Good agreement of the computed and experimental values indicates the high validity and reliability of these calculation programs.

| 野田桂- | 一郎* | Keiich | irô Noda | |
|------|-----|--------|----------|--|
| 山田 | 栄** | Sakae | Yamada | |

1 緒 言

X

1 3

往復圧縮機は間欠的に気体を吐き出すので,配管内に発生 この関係とマトリックスを用いて表わすと次式のようになる。

する圧力脈動が原因となり,配管の振動および圧縮機の体積 効率や所要動力の変化,場合によっては自動弁の破損を生ず ることがある。また,配管の強度設計の面からみても,数千 気圧に及ぶ超高圧圧縮機の配管では,内圧の変動が疲れ破損 の原因となることもある。このため,配管の計画にあたって は,事前に圧力脈動を計算し,共振の回避やダンパのそう入 などによる脈動の低減を図り,許容範囲内に押える必要があ る。

従来, 脈動の計算にはL, C, Rの電気素子を用いたダイ レクト タイプのアナログ コンピュータ(以下, アナコンと 略す)による計算方法が開発⁽¹⁾されており, 有効に活用され てきた。しかし, この方法は限られた技術者の手数を要する プログラミングとデータの作成および整理に時間がかかり, 最近の需要の増大に応じきれない実状にあった。一方, 化学 プラントは大形化, かつ複雑化してきており, ケース スタデ ィの必要性が増して, 計算量が増大する傾向にある。この解 決策として, データ処理の簡易化および計算時間の大幅短縮 化に着目し, ディジタル コンピュータ(以下, ディジコンと 略す)による圧力脈動の計算機プログラムを開発した。

2 圧力脈動計算法

気体の流速と圧力で脈動の状態を表わすことができるが、 配管内のある2点間には互いに波の伝搬遅れによる位相遅れ が生じており、2点間の圧力と流速(または流量)の間には 音速、距離、管径などで定まる一次関数で表わされる関係が ある。圧力脈動をP、質量流量脈動を & とし配管内の点1お よび点2に対応する値にそれぞれ添字1および2を付けて表 わすと、次の一次式が成立する。

ここに表われたマトリックスを伝達マトリックスと呼び、この解析法を伝達マトリックス法と呼ぶ。この方法による脈動 解析を図1に示す簡単な配管系を例にとり説明する。

音速,管径などの一様な区間では,配管内の2点間の関係 は(1)式で表わされるので,これらの条件の変化する点で配管 を切断すれば,おのおのの一様な区分の間では(1)式の関係で 管の入口と出口との関係を求めることができる。また切断点 では左右両端の圧力脈動および流量脈動とも連続であるから, 結局,逐次(1)式を適用していくと,次式のように出口端と入 口端とを直接結ぶ関係式を求めることができる。

上記, 4個の圧力と流量のうち, 二つが与えられれば, 他



 $P_1 = A_{11} P_2 + A_{12} \xi_2$ $\xi_1 = A_{21} P_2 + A_{22} \xi_2$ ここで A_{11} …は音速,距離,管径などで定まる定数である。

図 | 単シリンダの配管系の模型 伝達マトリックスの使用法の説明 図を示す。

37

Fig. I An Example for Piping

*日立製作所川崎工場 **日立製作所川崎工場 工学博士

は求まり、逐次伝達マトリックスを用いて切断点の圧力と流量の脈動がすべて求まる。たとえば、この例では、 ξ_1 は圧縮機から吐き出される風量として与えられ、管端が開放なら P_4 =0, 閉そくなら ξ_4 =0として与えられることになる。

E縮機の吐出し風量は三角形状の波形をしており、これを 調和解析すると多数のサイクルに分解される。伝達マトリッ クス法では、単一のサイクルについてのみ計算できるので、 各サイクルについてそれぞれ計算し、最後に位相を考慮して 全サイクルの結果を合成することができる。以上のように配 管要素の伝達マトリックスは非常に重要であるので、3.以下 において詳細に述べる。

8 伝達マトリックスの導入

3.1 一様な配管の伝達マトリックス

配管内を伝搬する圧力脈動振幅は絶対圧に比べ小さく,気体の音速は一定とし,管内流速を音速に比べて無視できると 仮定すると,下記の波動方程式が導かれる。

| $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - R \frac{\partial \xi}{\partial t}$ | (2) | | |
|---|--------------|--|--|
| $\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{a^2}{S} R \frac{\partial \xi}{\partial x}$ | 5 | | |
| こで、P: 圧力脈動 | <i>t</i> :時間 | | |
| <i>ξ</i> : 質量流量 | a:音速 | | |

次にオリフィスの場合について考えてみる。

配管の分布抵抗を無視し、管端にZなるインピーダンスがあるものとする。(5)式でR=0とおけば、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \xi_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\frac{\omega}{a}l & \frac{a}{S}j & \sin\frac{\omega}{a}l \\ \frac{S}{a}j & \sin\frac{\omega}{a}l & \cos\frac{\omega}{a}l \end{pmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ P_2 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \dots \dots (8)$$

また、この配管の後部に集中抵抗があり、しかもその出口 が開放端になっているとすれば、

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{Rc}{S} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} P_3 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{Rc}{S} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi_3 \end{bmatrix} \dots \dots \dots \dots (9)$$

(9)式より

$$P_2 = \frac{Rc}{S} \xi_3$$

 $\xi_2 = \xi_3$

 $P_2/\xi_2 = Z$ であるからRc/S = Zとなり、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \xi_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_2 (Z\cos\frac{\omega}{a}l + \frac{a}{S}j \sin\frac{\omega}{a}l) \\ \xi_2 (Z\frac{S}{a}j \sin\frac{\omega}{a}l + \cos\frac{\omega}{a}l) \end{pmatrix}$$

もし、 $Z = a/S$ 、 すなわちRcか a に等しいとすれば、
 $P_1 = \frac{a}{S} \xi_2 e^{j\frac{\omega}{a}l} \\ \xi_1 = \xi_2 e^{j\frac{\omega}{a}l}$

x:管方向の長さ **R**:管摩擦抵抗

S:管内断面積

いま,定常振動の解を求めるため,変数分離ができるものとして,

ω:角速度

と置き(3)式に代入し,振幅のみの関係式を導き,さらに境界 条件として,x=0で $P_0=P_1$, $\xi_0=\xi_1$, x=lで $P_0=P_2$, $\xi_0=$ ξ_2 と置いて,管の入口端と出口端との関係を求めると次の伝 達マトリックスで表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} P_{1} \\ \xi_{1} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\omega}{a} \sqrt{1 - \frac{R}{\omega}j} \ l \\ \frac{S}{a \sqrt{1 - \frac{R}{\omega}j}} j \ \sin \frac{\omega}{a} \sqrt{1 - \frac{R}{\omega}j} \ l \\ \frac{\frac{a}{S} \sqrt{1 - \frac{R}{\omega}j} \ j \ \sin \frac{\omega}{a} \sqrt{1 - \frac{R}{\omega}j} \ l \\ \cos \frac{\omega}{a} \sqrt{1 - \frac{R}{\omega}j} \ l \end{pmatrix} \begin{bmatrix} P_{2} \\ \xi_{2} \end{bmatrix}$$
....(5)

3.2 タンクの伝達マトリックス

 $\mathbf{38}$

理想的なタンクを仮定し、ある一定の容積のみ有するもの とすれば、(5)式で $l \rightarrow 0$ のとき、V = Slを一定としてタンク の伝達マトリックスを求めることができる。

となり、脈動は入口側に対し出口側が位相角 $\frac{\omega}{a}$ 1だけ遅れる のみで、振幅は一定となる。これは進行波のみ存在する無反 射の状態を表わしている。実験によれば、無反射の条件を満 足するオリフィスの開口比は約½とされている⁽²⁾。したがっ て、¼開口比のオリフィスの伝達マトリックスは(7)式で*R*c = a となる。

3.4 分岐管の伝達マトリックス

図2は分岐管を示すものである。C-3区間の関係をマト リックスを用いて表示すれば、次式が成立する。

2

さらに、分岐点における連続の条件として、

が成立する。点3において管端条件を入れて(10),(11)両式を解くと、次のように分岐管の伝達マトリックスが求まる。





図2 分岐管の模型 分岐管の伝達マトリックスの説明図を示す。 Fig. 2 An Example for Branch Pipe

閉そく端の場合 $Y = B_{21}/B_{11}$ $Y = B_{22}/B_{12}$ 開放端の場合 $Y = \left(\frac{a}{S} B_{21} + B_{22}\right) / \left(\frac{a}{S} B_{11} + B_{12}\right)$ 無反射の場合

4 圧縮機の吸込および吐出し風量

圧縮機の吸込および吐出し流量は、気体を非圧縮性と仮定 すると自動弁が開いている間のピストンの押しのけ量に等し くなる。この波形は三角波状をしており、 クランクの回転周 期を基本周期とする調和級数に分解することができる。2.で 述べた伝達マトリックス法は、単一の角周波数ωについての み取り扱うことができるので、おのおのの周波数に対して計 算し,最後に合成する。

吸込および吐出し流量の成分は、一般に次数が高くなるに 従って小さくなる。さらに配管系には脈動除去器としてタン クなどの積分形のフィルタを入れる場合が多く, 高次数の脈 動は減衰して;影響が少なくなるので,適当なところで切り 捨てても誤差は小さい。後述するように八次までの計算結果 が実験結果とよく一致しているので、われわれは八次までの 成分を採ることにした。

圧縮機の諸元(圧力比、コンロッド比、ポリトロープ指数 および間隙(げき)容積比)が与えられると、自動弁の開くクラン ク角が求まり、この角度をパラメータとして吐出し流量を調 和級数に分解することができる。圧縮機の諸元の中で圧力比



圧縮機の押し側吐出波形 クランク I 回転における圧縮機の押 义 3 し側吐出し流量をフーリェ展開し、一次から八次までの成分を合成した波形を 示す。

Fig. 3 Wave Form of Compressor Discharge Gas Flow



データ読み込み

のみを変化させて, 一次から八次までの調和級数成分を合成 した吐出し波形は図3に示すとおりである。実際の三角波に かなり近い形になっている。

5 計算機プログラムの概要

×.

6 3

- M.

プログラムは図4の概略フローチャートに示すように、ま ずデータを読み込み後, 圧縮機の吸込または吐出し風量を調 和級数に展開する。次に, 配管系の伝達マトリックスを計算 した後で、1個のシリンダ出口の圧力脈動を求め、この値と 吐出し流量の調和成分から各測定点の圧力脈動を計算する。 これを指定次数までくり返し計算する。最後に測定点ごとに 各次の圧力脈動の成分を合成して,計算結果を印字する。

プログラムはHITAC 8400 用に作成された。処理時間はき わめて迅速で、2シリンダの配管系で40秒、4シリンダの配 管系で75秒程度である。

次にプログラムの要点を簡単に述べる。

(1) 複雑な配管系も含め、計算しようとする配管系に容易に 変形できるように工夫し,配管系の標準パターンを作成した。 (2) 配管は長さ方向に自動的に分割して計算できるようにし た。

(3) 吸込, 吐出しの区別および圧縮機のロード, アンロード の条件は、簡単な指示で自動的に処理できるようにした。

(4) 各サイクルを合成した全圧力脈動のみならず、各次の圧 力脈動成分も印字し,脈動減衰器を設計する際の便を図った。 (5) 必要に応じて圧力脈動の波形もプロットできるようにした。

6 計算値と実験値との比較

6.1 実験装置と実験方法



Fig. 4 Outline of Calculation Flow Chart

供試圧縮機の仕様 表丨

Table I Specification of Compressor for Experiment

| 項 | E | _ | 形 | 式 | 37kW VHC |
|---|-----------|---|---------|---|------------|
| 定 | 格 | | 転 | 数 | 9 7 0 rpm |
| 定 | 格吐 | 出 | し圧 | カ | 7 kg /cm²G |
| シ | IJ | ン | ダ | 径 | 200mm ø |
| シ | IJ | ~ | ダ | 数 | 2 |
| 行 | t sola is | | - sije- | 程 | I 3 0 mm |

脈動実験で用いた圧縮機の仕様を示す。

39

実験装置の配置は図5に示すとおりである。表1に記述し た仕様の圧縮機の2個のシリンダから吐き出された空気は, 集合管で合流した後,空気槽(そう)に導かれ,空気槽の出口 側に取り付けられた放出弁を通して大気に放出するようにし た。実験では中形以上の圧縮機の仕様に合わせるため、圧力 比が1と3になるように吐出し圧力を0および2kg/cm2Gに



Fig. 5 Test Arrangement of Compressor Piping System



<



シリンダ吐出し口 シリンダ吐出し口

図 6 圧力脈動の計算値と実験値との比較 吐出し圧力 0 kg/cm² と 2 kg/cm²における圧力脈動の分布を示す。

Fig. 6 Comparison of Pulsation Amplitude(without short pipes)

40

図7 圧力脈動の計算値と実験値との比較(吐出し口に短管そう入) シリンダ吐出し口と集合管の間に短管をそう入した場合の圧力脈動の分布を示す。 Fig. 7 Comparison of Pulsation Amplitude(with Short Pipes)



測定点 5

100

X

8. 7

H

 Δq

1- M

MANNA ANNA ANA



図8 実験番号3と計算との波形比較 吐出し圧力2kg/cm²,短管そう入時の圧力脈動の波形を示す。 計算の場合は | 周期を、実験の場合は約3周期を示し、実験は計算に対応する | 周期をわくで囲んである。 Fig. 8 Comparison of Pulsation Wave Form (Experiment No.3)

合わせ、回転数は618rpmとし、圧縮機の吐出し口と集合管と の間に3½B×1,210mmの短管をそう入した場合, ½開口比の のオリフィスを空気槽の入口側フランジ間にそう入した場合 の実験を行なった。実験の条件は表2に示すとおりである。 圧力脈動は,配管系に設けられた8個所の測定点に圧力変換 器を接続し、オシログラフに圧力脈動波形を描かせるように してある。

6.2 計算値と実験値との比較

図6は実験値とディジコンの計算値を比較したものである。

実験の条件 表 2 短管およびオリフィスをそう入した場合の実験を行 なった。

8

Table 2 Condition of Experiment

| / | _ | | 実 | 験番号 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------|----|---|---|------|----|----|----|----|
| 吐出し圧力 (kg/cm ² G) | | | | m²G) | 0 | 2 | 2 | 2 |
| 短 | | | | 管 | なし | なし | あり | あり |
| オ | IJ | フ | 1 | ス | " | " | なし | " |

| 横軸は図の下側に記入した配管図の位置に対応する場所を示し、縦軸にはそれぞれ表2に記述した実験番号1および2の場合の脈動の実測値と計算値を脈動率で表わして記入した。 | 図に結果を記入した。 図7は図6と同様な表示方法で実験番号3および4の場合 |
|--|---|
| この両者の実験値に対し、計算値は振幅および分布の傾向が よく一致しており、圧縮機の吐出し風量の調和級数成分を八 次までとって伝達マトリックス法で求めれば、実用上十分で あると考えられる。また参考のため、アナコンでも計算し同 | の実験値と計算値との比較を示したものである。オリフィス のない場合は, 閉そく端で圧力脈動が大きく, 開放端で小さ い典型的な一次の振動モードになっているが, オリフィスを 入れることにより, この定常波のモードがくずれ, 全配管の |
| | 41 |

脈動がほぼ一様になっており、これらの状況は両者とも非常 によく一致している。開口比¼のオリフィスは無反射の条件 を満たすこと、ならびに無反射の計算方法が妥当であること が確認された。

さらに波形についても比較してみた。図8は実験番号3の 実験および計算の圧力脈動波形をそれぞれ上下に並べて一対 とし、各測定点について比較したものである。計算では1周 期の波形を示してあるのに対し、実験では約3周期の波形が 示してあり、後者の図中には計算値と対応するように1周期 についてわくで囲んで示してある。図9は実験番号4の測定



点3および7における波形の比較を示すものである。波形に つていも視覚的にではあるがよく一致しているので,各振動 成分に至るまで,かなりよく一致しているものと思われる。

4シリンダの場合の実験は、実験機の都合で行なわれなかったが計算機プログラムの確認のため、実際の配管系を例にとり、アナコンとの計算比較を行なった。その結果は図10に示すとおりである。計算条件は同図中に示してある。

5.

*

100

C

以上の比較からわかるように脈動率の分布については,デ ィジコンおよびアナコンの計算値はよく一致している。アナ コンによる計算法についてはすでに確立されているが,ディ ジコンによる計算も同程度の精度で計算できることが明らか になった。

7 結 言

往復圧縮機配管系の圧力脈動の計算は従来アナコンによっ ていたが、ディジコンによる能率的な計算機プログラムを開 発することができた。

圧縮機の吸込および吐出し風量の波形を調和級数に分析す るプログラムならびに管の出口および入口端の圧力脈動と流 量脈動との関係を表わす伝達マトリックス プログラムを作成 し、これらのプログラムを総合した脈動の解析プログラムを 開発した。さらに、このプログラムの精度を確認するため、 脈動実験装置を用いて、種々の条件で実験した結果、計算結 果とよく一致することを確認した。また、アナコンによる計 算結果と比較し、これもまた両者がよく一致することを確認 した。本計算機プログラムの開発により、計算に要する時間 および労力の大幅な低減となり、脈動の少ない配管系の設計 に寄与できるものと考えている。



図 9 実験番号 4 と計算との波形比較 吐出し圧力 2 kg/cm²,短管 およびオリフィスそう入時の圧力脈動の波形を示す。無反射状態になったため, ③ と ⑦ の波形は類似しているが,位相は遅れている。

Fig. 9 Comparison of Pulsation Wave Form (Experiment No.4)

参考文献

- (1) 大谷,山田「往復圧縮機の圧力脈動シミュレータ」,機学会誌 66,532(昭38-1)
- (2) 山田,大谷「オリフィスおよびπ形配列空気そうによる脈動 除去」,機学会論文集34,268(昭41-4)



図10 4シリンダの場合の計算比較 4シリンダを有する超高圧圧縮機の配管系の圧力脈動の分布を示す。 Fig. 10 Comparison of Pulsation Amplitude

42