

# D

## プラントの設備診断技術 ～振動診断技術を主として～

石油・化学・製鉄プラントなどでは、圧縮機・ポンプ・モータなど動力機械から配管・熱交換器・反応槽など機器類まで様々な設備が稼働しており、それら設備を計画通り運転するためには日常の設備診断は非常に重要である。設備診断技術の中で最も多く使われている技術が振動技術であり、実用中の設備診断技術の約2/3を占める\*1)。ここでは、圧縮機・ポンプ配管系の振動診断技術を中心に、回転機の振動診断、音による診断などの技術について解説する。

設備診断に係わる国内外の基準化は活発であり、ISOでも古くから規格化されており、例えばISO 10816シリーズに回転機の軸受け振動基準がある。配管系の振動基準に関しては、最近まで公的に基準化されたものがなく、SwRI (米国の研究機関)が1976年に公表した配管振動基準が現場では広く使われている。米国石油協会規格API 618は配管圧力脈動値を基準化しているが、第5版(2007年)では設計段階での往復圧縮機回りの配管振動基準も制定した。一方、ISOでも往復圧縮機配管系の振動を規格化しようとする動きがある。また、設備診断技術者の技術レベルの国際的な統一を図るためにISO 18436が制定され、国内では2004年から日本機械学会が機械状態監視診断技術者(振動)の資格認証を担っている\*2)。

設備診断は、機械・機器の特性・重要度に合った対応、適正な計測機器と解析ツールの選定、判定するための基準値、診断する人の技術、などが重要であり、以下に事例を含めて解説する。



EM事業部  
CAE・実験解析技術部  
振動音響技術室

廣岡 栄子



エンジニアリングメカニクEM事業部  
CAE・実験解析技術部  
振動音響技術室

緒方 剛

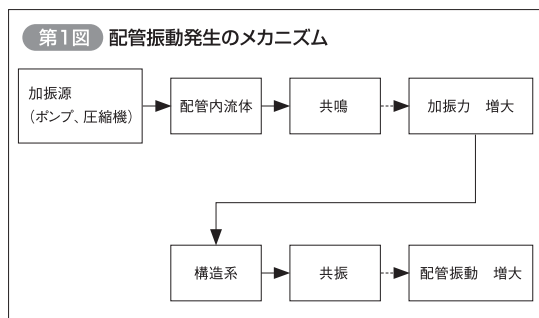
### D-1 配管振動診断

この章では配管振動診断について解説する。

#### 1-1 配管振動が起こるメカニズム

圧縮機やポンプなどから機械的に伝わる振動に起因する配管振動はほとんどの場合、大きな振動問題にはならないので、ここでは流体の圧力脈動に起因する配管振動について述べる。圧力脈動起因の配管振動診断・解析技術は神鋼グループとして40年以上の歴史があり、常に国内の技術をリードしてきた\*3)。往復圧縮機やプランジャーポンプのような容積形ではその吸込み/吐出し流量変動が間欠的であるため、圧力脈動が生じる。第1図に、配管振動の発生の流れを示す。

まず、加振源となる圧縮機やポンプの回転周波数(以下、加振周波数)が配管内のガスや液体の共鳴周波数と一致すると、気柱(液柱)共鳴を起こし、圧力脈動が増大する。このとき、機械振動が発生したり、圧縮機などの性能低下、動力損失をもたらすことがある。



さらに、構造系の固有振動数が圧縮機などの加振周波数や流体の共鳴周波数と一致すると、共振現象を起こし、配管の振動振幅がさらに増大する。

以上のように、配管振動が起こるメカニズムは流体系の振動と構造系の振動が複雑にからんでいる。過大な配管振動が起こった場合、被害を最小限に留めるために、速やかに、的確な原因究明と有効な対策を施すことが必要である。そのためには、測定および数値シミュレーションは有用な手段である。

#### 1-2 配管振動診断の手順

配管振動や圧力脈動の基準が整備されている往復圧縮機配管系を例に、配管振動の原因究明および対策案検討を行う場合の手順を第2図に示す。

すでにプラントが稼働している場合、プラントの負荷増減など運転条件が変更になると、振動が変化することが多々あるので、定期的に振動を測定し、データを蓄積し、振動が大きい部位の把握、振動の変化を知ることが非常に重要である(ステップ1:簡易測定)。振動に変化が見られる場合は、複数の振動計を用いて同時に測定をすることにより実稼働時の振動モードの把握をすることが有効であり、当社の特長技術としてよく用いている。さらに、圧力脈動を測定すれば共鳴の有無や加振周波数の何次の脈動値が大きいかわることができ、原因究明の手助けとなる(ステップ2:詳細測定)。第3図に実稼働時の配管振動モードの一例を示す。多点同時測定を行うことにより、振動モードを可視化することができる。圧力脈動値が

#### 参考文献

- \*1) 日本鉄鋼協会編:「設備診断技術ハンドブック」、1986年
- \*2) 岩壺卓三:日本機械学会誌、Vol.113、No.1103、2010年、p.34
- \*3) 阿部亨ほか:日本機械学会論文集、35-277、1969-9、p.66

参考文献

- \*4) 日本機械学会編:「事例に学ぶ流体関連振動」、2008年、p.190
- \*5) 藤川猛ほか:R&D神戸製鋼技報、Vol.37(1987)No.1、p.59
- \*6) Kato, M., Hirooka, E., et al., Symposium on Flow-Induced Vibration and Noise, ASME Winter Annual Meeting, Vol.6, 1992, pp.237-244
- \*7) 加藤稔ほか:日本機械学会論文集、58-554、C(1992-10)、p.2907
- \*8) API(American Petroleum Institute) Standard 618, 5th edition, December 2007.

API規格(第1表参照)を超えた場合、また、振動測定値が、SwRI配管振動評価基準\*4) (第7図参照)でCorrection領域以上になった場合、何らかの対策を施すことが必要であり、数値シミュレーションを用いて対策案を検討する。

まず、配管内の共鳴周波数解析を行い、圧縮機の加振周波数とガスの共鳴周波数との一致の有無を調べる(ステップ3-1:共鳴周波数解析)。一般に、往復

圧縮機回りの配管内流体は1次元流れの問題として取り扱うことができる。管内流体の運動方程式および連続の式から外圧力の加わる流体系全体の運動方程式は有限要素法を適用\*5)~\*7)すると次式のようになる。

$$[M]\dot{q} + [C]q + [K]\int q dt = P_f \quad (1)$$

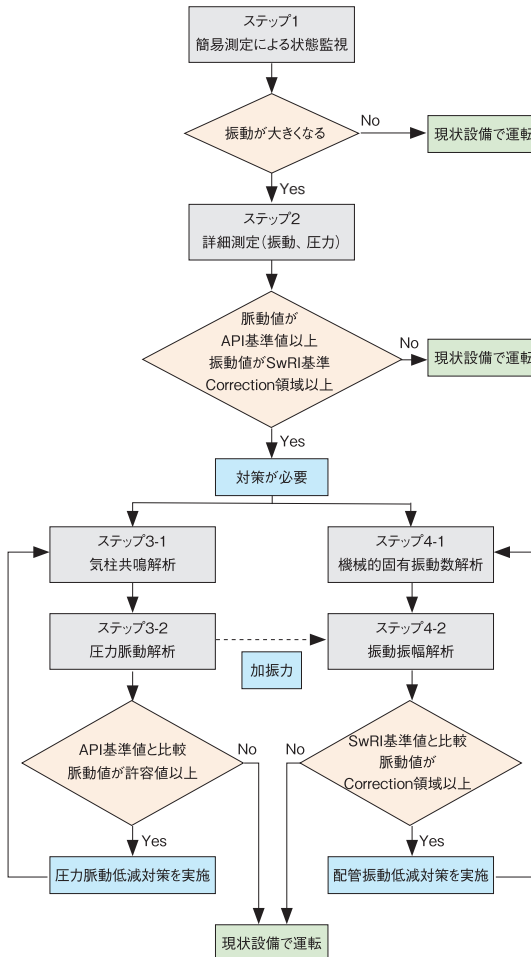
ここで、M、C、Kはそれぞれ質量、減衰および剛性マトリックス、qは流量、 $P_f$ は外圧力ベクトルを示す。

配管内流体の共鳴周波数は(1)式の運動方程式を用いれば、機械構造物の固有振動数解析によく用いられる解法を利用して算出することができる。ここで得られた共鳴周波数と加振周波数を比較して、共鳴現象が起こっているか否かを判断することができる。

次に、圧縮機からの流体力を加振力として(1)式に与え、圧力脈動解析を行い配管系各部の流量および圧力脈動値を求める(ステップ3-2:圧力脈動解析)。配管内脈動計算の精度を大きく左右する配管内の流体減衰力の評価方法は非常に重要である。一般のプラント配管の流体減衰は、管摩擦、管径変化部、バンド部、オリフィスなどの圧力損失が主なものであり、これらを適切に考慮する必要がある。

数値解析によって得られた配管内の圧力脈動値の評価基準としては、一般に、第1表に示すAPI規格618\*8)の圧力脈動値が用いられている。ある配管の圧力脈動解析結果の一例を第4図に示す。横軸は周波数、縦軸は圧力脈動値を示す。この図から、回転周波数(この例の場合7Hz)の整数倍となる高調波成分の圧力脈動が現れているのがわかる。また、点線はAPI規格による許容値を示しており、本配管系では2次と5次でAPI許容値を超えていることがわかる。この場合は、オリフィスや共鳴器の設置、サージドラムの容量を増やすなどの対策が考えられる。特に、オリフィスはコストパフォーマンスの良い対策法として広く

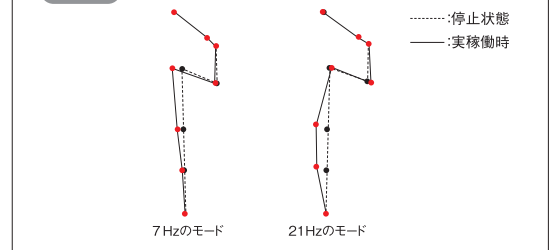
第2図 配管振動 設備診断の手順



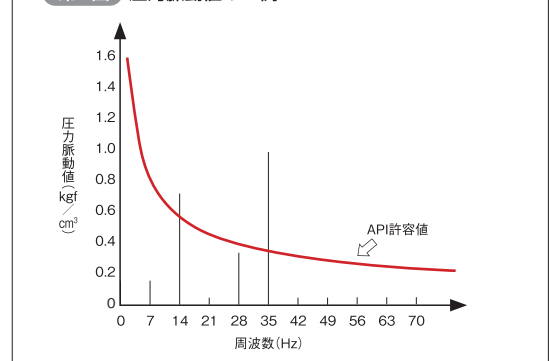
第1表 API規格618の圧力脈動許容値

デザインアプローチNo.	圧力脈動許容値	記号	備考
1	$P_i = 4.1 / (PL)^{1/3}$	$P_i$ :許容圧力脈動率(%) (=圧力脈動両振幅/PL) PL:配管内平均絶対圧力(bar)	・脈動抑制機器(スナッパ)の配管側ノズル部での許容値。 ・配管内の許容値は規定されていない。
2	$P_i = (a/350)^{1/2} [400 / (PL \cdot D_i \cdot f)^{1/2}]$	$P_i$ :許容圧力脈動率(%) (=圧力脈動両振幅/PL) PL:配管内平均絶対圧力(bar) $D_i$ :配管内径(mm) f:脈動周波数(Hz)= $N \cdot Z / 60$ N:往復圧縮機回転数(rpm) Z:1,2,3... a:ガスの音速(m/s)	・配管系全体の許容値。 ・往復圧縮機と配管系の連成を考慮した脈動解析を要求している。
3	デザインアプローチ2と同じ	デザインアプローチ2と同じ	・デザインアプローチ2と同じ。 ・圧縮機、配管の固有振動数計算、およびこれらの固有振動数と圧力脈動周波数との一致を避けることを要求している。 ・これが回避できない場合は、圧力脈動による振動応答計算を要求している。

第3図 実稼働時の配管振動モード線



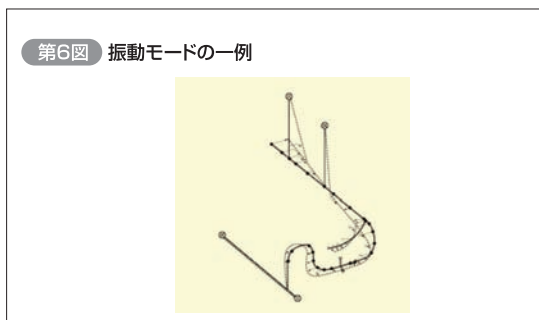
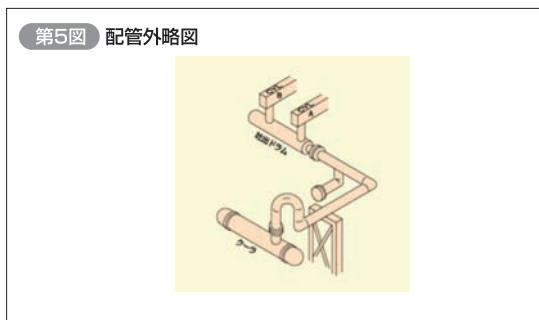
第4図 圧力脈動値の一例



用いられている。オリフィスは流量変動の大きい場所に取り付けることに注意が必要である。オリフィスの最適な位置と形状を、ニューラルネットワークを用いて求める方法も公表されている\*9)。

ステップ4として、配管系の振動解析を行う。まず、配管系の固有振動数を求め、加振周波数や共鳴周波数に一致の有無を確認する必要がある(ステップ4-1:固有値解析)。配管内に圧力脈動が生じると、配管に加振力として作用する。圧力脈動により加振される配管部はバンド、分岐、管径変化部、オリフィス挿入部、閉端部である。これらの部位は、常に変動力を受けるため、圧力脈動の周波数が構造系の固有振動数と一致すると、大きな配管振動が生じる。ステップ3-2で得られた各部の圧力脈動を、位相を考慮して加振力として与え、流体と構造の擬似連成解析を行い、変位、応力などの応答を求める(ステップ4-2:配管振動解析)。

第5図に配管系の一例を示す。この配管系の振動モードのひとつを第6図に示す。配管の各部位における振動振幅の大きさを判断する基準として、SwRIが公表している配管振動評価基準を適用することが多い。第7図は、SwRIの配管振動評価基準に解析結果をプロットした一例を示す。数値解析を用いると実測が困難な部位についても振動値を求めることができる。さらに、実測では捉えにくい最大振幅箇所を求めることが可能であり、非常に有用な手段である。

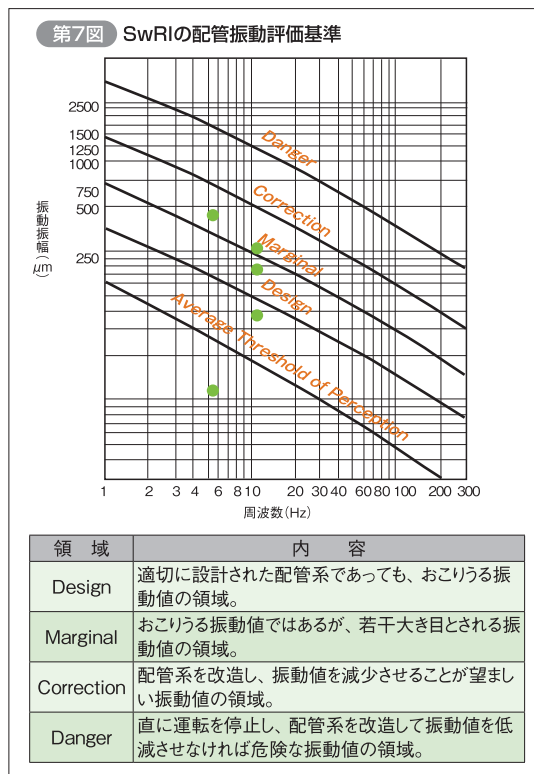


振動振幅値がCorrection領域以上になった場合、加振周波数と配管の機械的固有振動数が一致している場合が多い。サポートを取り付けて、共振を避けることが必要である。固有振動数との一致の有無は、メンテナンスなどのプラント停止時に、ハンマリング試験により固有振動数と固有モードを測定することで確認できる。

解析のモデル化を行うとき、図面にはないサポートが存在する場合やサポート方法が異なることが多々ある。解析者も現場の状況を十分確認し、実際のサポートの拘束条件を測定により把握し、バネ定数としてモデル化に反映する必要がある。

また、振動しやすいドレンや脈動力を受けやすいバルブの補強・サポートも重要である。ドレンや圧力計などの計装品が付いた小口径配管の分岐部は、振動しやすいので、サポートや溶接方法を工夫して、剛性を高める対策をとる必要がある。さらに、バルブなどは脈動を受けやすいので、充分剛性のある基礎や構造物から支持を取り、強固にしておく必要がある。

以上の圧力脈動解析から配管振動解析に至る一連の当社の解析技術は、国内トップの実績と技術を保有していると考えており、また圧力脈動解析手法は特許も取得している。



参考文献

- \*9) 廣岡栄子ほか:日本機械学会 機械力学・計測制御講演論文集、Vol.A, 1992, pp.690-694
- \*10) 日本機械学会 振動工学データベース研究会編: v\_BASEデータベース【第2版】ガイドブック
- \*11) 振動技術研究会 ISO基準に基づく機械設備の状態監視と診断

## D-2 その他の診断技術\*10) \*11)

### 2-1 回転機械

回転機械の状態監視を行うことは、プラントの致命的なトラブルを未然に防ぐために重要である。第2表に、ISO10816-1の回転機械の非回転部分の振動判定基準を示す。

機械構造物に異常が発生するとその周波数特性に変化が現れる。状態監視をすることでその変化を把握することができる。回転体の異常振動の原因で最も多いのは、不釣合いである。この場合の振動には、周波数は回転同期成分であり、再現性があることが特徴である。不釣合い力による振動振

幅を抑制するためには、1) 回転軸のバラシング作業を行って、質量のアンバランスをなくす、2) 軸の定格回転速度と軸・軸受系の固有振動数を一定以上離す、3) 共振点を通過する場合は軸・軸受系の減衰比を高めることが必要である。

## 2-2 騒音

例えば、回転機の転がり軸受に損傷が発生した場合には、振動だけでなく、騒音にも異常が現れる。一般に、1000Hz以下では振動、1000Hz以上は騒音として問題になる。

騒音の発生は固体振動と流体の圧力変化によるものがある。機械振動および固体伝播音の対策としては、加振力の低減のほか振動絶縁、共振回避などが考えられる。ファンやコンプレッサ、ポンプなどでは機械の運転によって羽根枚数に関連した周波数の外乱や流量変動が生じ、圧力変動を発生して騒音の原因になる。第8図に圧縮機本体+電動機カットモデルを示す。流体系の音源対策には、第8図に示すスクリュの羽根形状を変える\*12)、流速を下げる、急な曲がりや断面積変化を減らす、容

### 参考文献

- \*12) 小谷重遠ほか: 機械振興協会 第2回新機械振興賞受賞者業績概要 高速電動機直結型高効率、増風量スクリュ圧縮機の開発
- \*13) 高圧ガス保安協会: 高圧ガス設備等耐震設計指針
- \*14) (独) 科学技術振興機構ホームページ: <http://shippai.jst.go.jp/fkd/Detail?fn=0&id=CB0031024&>

第2表 振動速度の規格(ISO 10816-1)

振動シビアリティ		ISO規格			
レンジ	速度実効値 [mm/s]	クラスI	クラスII	クラスIII	クラスIV
71	45	D	D	D	D
45	28				
28	18			C	B
18	11.2				
11.2	7.1	C	B	A	
7.1	4.5				
4.5	2.8				
2.8	1.8				
1.8	1.12	B	A	A	
1.12	0.71				
0.71	0.45				
0.45	0.28				
約1.6倍	0.28	A	A	A	A

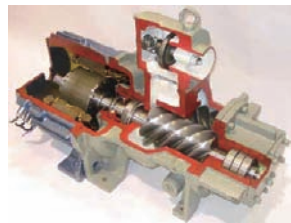
クラスI 小型機械(たとえば15KW以下のモーター)  
 クラスII 中型機械(たとえば15~75KW以下のモーターや300KW以下の機械)  
 クラスIII 大型機械(剛な重い基礎に据え付けた場合)  
 クラスIV 大型機械(比較的柔らかな基礎に据え付けた場合)  
 回転数 600~12000rpm 振動測範囲 10~1000Hz

積型消音器の挿入などが有効である。

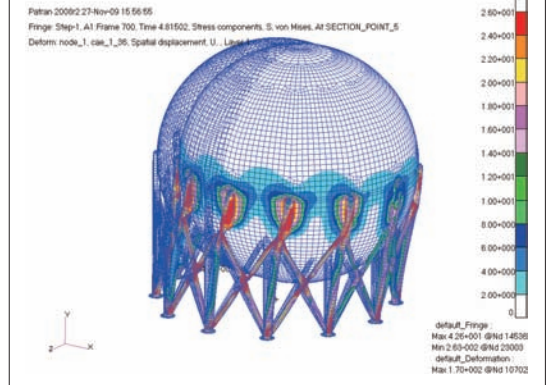
## 2-3 耐震診断

高圧ガス設備等に係わる耐震設計は「高圧ガス設備等耐震設計指針」\*13)に基づいて行われている。兵庫県南部地震後は、それまでの塔槽類およびその支持構造物ならびに基礎に加えて、配管系も耐震設計の対象に加わった。さらに、配管系の重要度がIa、Iの場合、配管系の応答解析による設計が必要となる。基本的には修正震度法が用いられており、これは静的設計の簡便さに動的手法を取り入れた準動的手法である。その他、モード解析法や時刻歴解析法を用いることがある。時刻歴応答解析法は振動モデルに設計用地震波を与えて、変位、加速度および応力の時々刻々の変化を求めることができる。また、機構解析手法を用いると、地震時の挙動を可視化できる。第9図に球形タンクの時刻歴解析を行い、ある時間での応力分布を示す。プラントの設備の中には40、50年使用されているものがあるので、新しい耐震基準を用いて診断することを推奨する。

第8図 圧縮機本体+電動機カットモデル



第9図 球形タンクの地震応答解析(応力分布)



圧縮機・ポンプ配管系の振動診断技術を中心に設備診断技術を紹介した。振動は、機械的な振動伝搬だけでなく、構造系と流体系が複雑に絡み、時には制御系も絡んで生じる場合もあるため、発生メカニズムを理解せずに対策を講じると、例えば火力発電所設備で発生した小口径配管のき裂発生

事故\*14)のように、対策が逆効果の場合もある。したがって、振動測定・データ分析など発生状況の把握と同時に、振動発生物理的な理解、数値計算による振動原因確認と対策、これらを実行できるエンジニアの育成が非常に重要である。