

# ポンプ回り配管系の異常振動の原因解析および対策

馮 芳 (技術本部 技術部)

生産現場において、異常振動により配管溶接部に亀裂が生じたり、フランジ部や弁類から液、ガスが漏れたりする事故がしばしば発生する。配管振動の励振源は、近傍の装置の機械的な振動によるものと配管内の流体の流動によるものがある。配管に異常振動が発生した場合、有効な対策を立てるためには、その発生メカニズムを究明することが必要である。特に、異常振動が流体に起因する場合、その原因が多様であるため、異常振動の原因を特定することが難しい。本稿では、配管振動の発生メカニズムとそれぞれの振動周波数の特徴および異常時の現象を論述し、現場の配管異常振動事例を用いて、診断方法と振動低減対策を紹介する。

## 1. はじめに

現在、各種プラントでは、配管系の検査、診断などが大きな課題となっている。経年劣化による腐食や疲労破壊などが配管の代表的な損傷事例である。また、異常振動により配管が損傷したり、フランジ部や弁類から液、ガスが漏れたりあるいは、配管に設置している圧力計などの計器が破損し、プラントの運転に悪影響を及ぼすことも少なくない。

当社は、プラントの建設とメンテナンスを事業として展開している。また、配管の設計から工事までの業務に対応するだけでなく、配管トラブルの解決や防止などのサービスも提供できるように努めている。さらに、高度な技術が必要となる配管の振動・騒音問題の診断と制振対策の提案から整備工事の計画、実施など一連のサービスを提供している。そのため、配管振動の発生メカニズム、振動の特徴および制振対策などに関する研究を行っており、現場における配管の異常振動トラブルの診断と解決に寄与している。

## 2. 配管の振動とその起因

### 2.1 機械的な誘因による配管の振動

配管の振動を誘起する機械的な原因は主に以下の3つがある。

#### (1) 回転機械のアンバランスやミスアライメント

配管周囲のポンプやブロー、圧縮機などの回転機械のアンバランスやミスアライメントにより励振力は大きくなり、正常状態より大きな振動を励起する。励起する振動の特徴周波数は、アンバランスの場合、回転周波数に等しい  $f=N/60$  であり、ミスアライメントの場合には、回転周波数およびその整数倍の高調波  $f=nN/60$  である。ここで、

$f$  : 振動周波数 (Hz)

$N$  : 回転数 (または往復速度) (rpm または cpm)

$n$  : 整数 1,2,3,... である。

#### (2) 往復動圧縮機やポンプによる圧力脈動

往復動圧縮機やポンプが作動するとき、ピストンの動きに応じて間欠的に流体を吸引・吐出するため、周期的な流量変動を生じ、それに伴い圧力脈動が発生する。圧力脈動が励振力になり、圧縮機の場合、振動数  $f=nN/60$ 、ポンプの場合、振動数  $f=nNP/60$  の振動を励起する。ここで、

$P$  : ポンプのプランジャ (ピストン) 数 である。

#### (3) 遠心圧縮機やポンプによる圧力脈動

遠心圧縮機やポンプが作動するとき、ブレードの動きやディフューザの羽根数などにより周期的な流量変動を生じ、それに伴い圧力脈動が発生する。圧力脈動が励振力になり、振動数  $f=nN/60$  または、 $f=nBN/60$ 、 $f=nuN/60$  の振動を励起する。ここで、

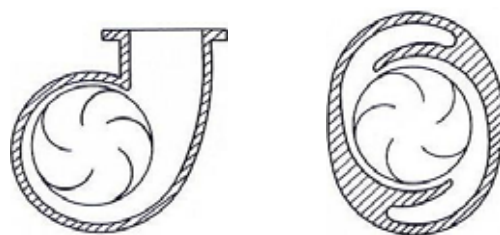
$B$  : ブレード数

$u$  : ポンプケーシングのポリュート数 (図1)

または、ディフューザの羽根数 である。

上記のような機械的な原因により励起する振動は、それぞれ特徴的な周波数を持つため特定しやすい。これらの振動数が配管系統の固有振動数あるいは共鳴周波数と一致すると、配管に共振や共鳴などを引き起こして、異常振動や大きな騒音が発生する。また、回転数が可変速の場合、特定の回転数でのみ共振が発生することがある。

よって、異常振動を解消するためには、まず回転機械のアンバランスやミスアライメントを修正整備する。また、配管系統の共振周波数と振動を引き起こす励振力の周波



a) シングルポリュート      b) ダブルポリュート

図1 ポンプケーシングのポリュート数

数をなるべく引き離すのが基本である。本来、プラントの設計段階で配管系の固有振動数を計算し、それを考慮した上で設備を選定すればよいが、一般的なプラント設計では計算しないのが実状である。既設のプラント設備には、配管の構成や回転機械の運転条件(回転数など)を変えることは難しいため、もっとも使われているのは配管サポートの補強により固有振動数を上げることである。また、場合によりサポートを適当に撤去して、固有振動数を下げるのも一つの方法である。

## 2.2 流体的な誘因による配管振動

配管振動を誘起する流体的な原因は主に以下の5つがある。

### (1) 制限物での圧力降下

配管系統に各種の弁類やノズル、またはストレーナー、フィルター等制限、遮断物により圧力減少のあるところに、または短い突出部やチューブがあるところに、流速や圧力の急な変化に応じて、高いまたは中レベルのアコースティックエネルギーが発生し、幅の広い帯域で、中高周波数の振動を励起する。励起する振動の周波数は  $f=SV/D$  である。ここで、

S: ストローハル数, 0.2~0.5

V: 流体の流速 (m/s)

D: 規制部直径, またはチューブ直径(m) である。

### (2) 乱流

配管系の構成上の不備,例えばエルボが多かったり、配管接続部のミスアライメントなどで配管内部の流れが不安定になり、乱流を生じる。それに伴い流体の不安定なエネルギーでランダムな振動が誘起される。振動の周波数は低周波で、典型的な範囲は  $f=0\sim 30\text{Hz}$  である。

### (3) キャピテーションやフラッシング

キャピテーションやフラッシングにより高いレベルのアコースティックエネルギーが発生し、特有の騒音に伴い中高周波数の振動が励起される。その周波数は広範囲で、特定の値がない。

### (4) ウォータハンマー

液体を搬送する配管において、設備が運転停止あるいは運転開始のときに、流速の変化に伴い圧力の変化が生じる現象をウォータハンマーという。ウォータハンマーにより急激な圧力の変化が生じ、配管に衝撃的な荷重が加わり、不連続の衝撃振動を励起する。

### (5) サージングや旋回失速

サージングが起こる場合、0.1~10Hz以下の低周波振動が典型的である。旋回失速の場合、失速セル数が1箇所に対して回転周波数より低い周波数の振動が発生する。失速セル数が複数の場合、振動周波数が複数倍になる。

機械的な起因に比べると、流体的な起因の特定は難しく、

設計段階での予防対策もほとんど不可能である。

上記の中で、(1)項の現象は通常、気相流に発生する。(2)項から(5)項の現象は通常、液相流または気液二相流に発生する。

このような流体的誘因による振動に対しては、とるべき対策が状況により異なる。(1)項の場合には構成上励振源となった制限物や突出物などの改造や撤去、または型式の変更を行う。(2)と(3)項の場合には流体の流動状況(圧力、流量、流速、温度など)を改善するか、構造や構成上の問題ならその修正改造、あるいは異物の除去を行う。(4)項の場合には配管のサポートを十分に増強することが基本である。(5)項の場合にはポンプなどの運転点を変えるのが最も有効である。

## 2.3 配管振動の起因分析の一般的な考え方

配管系の異常振動のトラブルを解決するために、どう考え整理すればよいか、その一般的な考え方を図2に示す。

振動を測定する前に、まず可能性のある起因をできるだけ想定し、それぞれを検証できるような計測や解析方法を計画して現場計測を実施する。もちろん、必要に応じて、振動だけでなく温度や圧力、流量、駆動電流値などのチェックも忘れてはいけない。

## 3. 配管振動事例紹介

### 3.1 設備構成

配管系統とその周囲設備の構成イメージを図3、図4に示す。回転機械はモーターとポンプがあり、モーターの容量は75kW、回転数は1750~1780rpmである。ポンプの性能曲線を図5に示す。モーターとポンプはセットで基礎に取り付け、防振ゴムを介して床に据付けている。ポンプは吸引口と吐出口に短いフレキシブル管を経由してパイプと繋がり、約40の温水を循環させる。パイプから水槽へ水を放出する放出口は左右それぞれ設けられている。

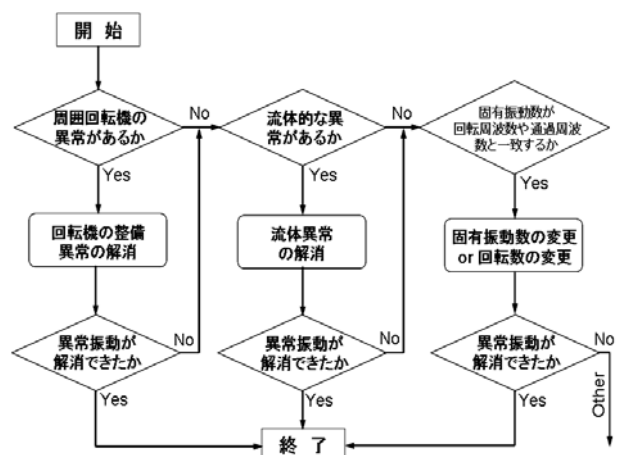


図2 配管振動の原因分析時の考え方

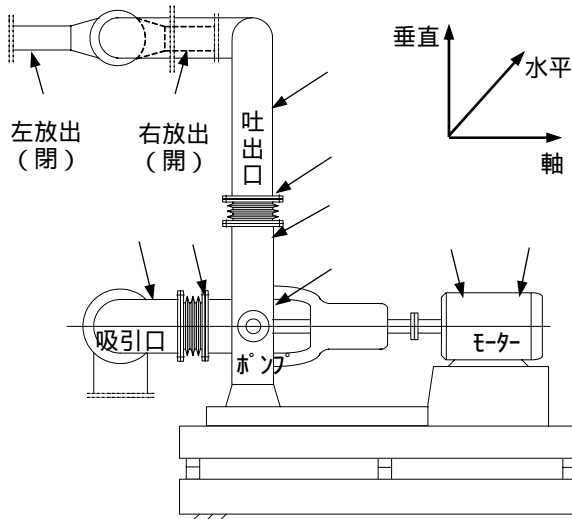


図3 配管システムの構成（正面）

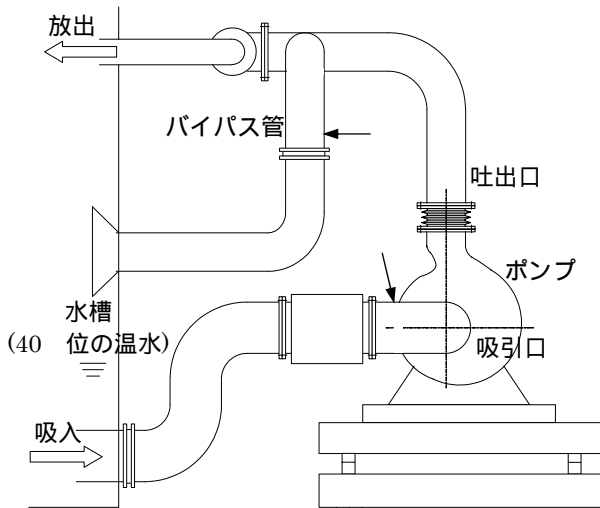


図4 配管システムの構成（側面）

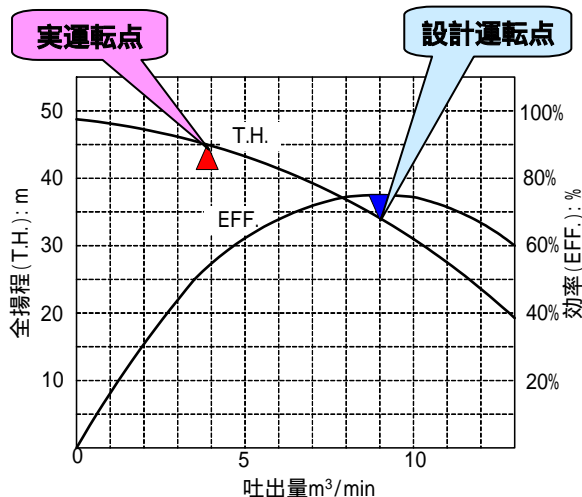


図5 ポンプの性能曲線

### 3.2 運転状況と異常現象

設備の試運転をしたところ、配管系に揺れや騒音が異常に大きいことが五感と振動値計測で分かった。また、大きな揺れにより左右放出管手前のバルブのガスケットが一度破れ、漏れることもあった。

実運転時、プロセスの関係で吐出水の圧力は約 0.4MPa 以上が必要なため、実運転点は図5の性能曲線に示した圧力が約 0.45MPa、流量が約 4m<sup>3</sup>/min のところであり、示した設計運転点に比べて効率が悪い。また、左放出口は常時閉とし、右放出口のみを開としたため、ポンプの流量能力が実際使用時に必要な流量よりも高かった。

その後、振動を低減するために吐出側にバイパス管を増設したり、吐出口や吸引口および放出管にサポートを補強増設したりしたが、異常振動を完全に解消することができなかった。なお、バイパス管を増設したが、その放流口を水槽壁の直近に設置したため、高圧の水を放流すると水槽壁が衝撃により大きく揺れた。そのため、実運用には至らなかった。

### 3.3 配管システムの異常原因診断

異常振動の起因を究明し、最適な整備対策を提案するために精密診断とデータ分析を行った。

#### 3.3.1 振動計測箇所

配管システムと設備の型式、運転条件、さらに搬送する流体状況とプロセスなどを調査した上で、振動測定を実施した。測定箇所は、モーターとポンプの本体や基礎、配管の各部など合わせて 20 箇所以上を設定したが、紙面の都合で図3と図4に示す 12 箇所（～）のデータのみを示す。

#### 3.3.2 計測結果と診断分析

計測した振動パラメータは、振動変位（DISP）、速度（Lo）、加速度（Md、Hi）の実効値（RMS）およびピーク値（両ピーク値 PP、片ピーク値 P）である。それぞれパラメータの周波数範囲を表1に示す。

また、振動判定基準を表2に示す。ポンプとモーター本

表1 測定振動パラメータの周波数範囲

振動パラメータ	周波数範囲
変位(DISP : μm) : RMS, PP 値	5Hz~200Hz
速度(Lo : mm/s) : RMS, P 値	3Hz~1kHz
加速度(Md : m/s <sup>2</sup> ) : RMS, P 値	3Hz~10kHz
加速度(Hi : m/s <sup>2</sup> ) : RMS, P 値	10kHz~40kHz

表2 回転機本体部と配管部の判定基準

回転機部		配管部	
変位_RMS	71μm	変位_PP	150μm
速度_RMS	4.5mm/s	速度_P	15mm/s

体部の基準値は、ISO10816-1に記載された一般回転機械の振動判定基準に基づいた値を、配管部の基準値は図6の米国 SwRI (Southwest Research Institute) の配管振動判定基準に基づいた値を採用した。

計測は吸引流量や吐出流量などの運転条件を変えて、数回の計測を行った。ここでは、実運転条件の下で、パイプ管が全閉の状態と2/7開の状態の2つの振動データを使って説明する。回転機本体部の振動測定値を表3に、

表3 回転機本体部の振動測定値

測定箇所	測定方向	DISP_RMS (μm)	DISP_PP (μm)	LO_RMS (mm/s)	LO_P (mm/s)	
回 転 機 本 体 部	モーター反 駆動側	垂直	36.5	141.0	4.34	13.89
		"	30.8	119.9	1.67	5.15
		水平	21.4	86.0	1.76	6.34
		"	25.3	96.0	2.14	6.57
		軸	30.0	129.8	4.14	14.08
		"	19.4	86.9	3.54	9.86
	モーター 駆動側	垂直	35.4	122.7	2.39	6.93
		"	20.6	61.7	1.63	5.27
		水平	21.3	82.7	1.97	6.48
		"	18.2	67.8	1.90	6.71
		軸	37.4	157.0	3.37	10.34
		"	27.1	128.1	2.97	8.83
ポンプ 駆動側	垂直	<b>80.5</b>	158.8	2.62	8.40	
	"	39.7	79.4	2.10	7.12	
	水平	<b>73.8</b>	157.9	2.79	9.23	
	"	39.8	79.6	2.47	7.14	
	軸	<b>74.8</b>	154.8	<b>5.19</b>	14.84	
	"	47.3	120.0	3.88	11.12	
ポンプ 吸引口	垂直	<b>75.0</b>	156.1	4.14	12.53	
	"	48.6	105.5	3.30	11.77	
	水平	<b>79.8</b>	161.2	3.18	10.21	
	"	54.9	137.7	3.07	10.14	
	軸	<b>78.8</b>	165.6	3.79	15.74	
	"	<b>135.7</b>	263.3	3.28	11.95	
ポンプ 吐出口	垂直	<b>90.8</b>	174.1	3.04	9.53	
	"	<b>117.9</b>	245.8	2.39	7.90	
	水平	<b>92.6</b>	186.2	3.24	10.25	
	"	44.6	138.5	4.48	14.55	
	軸	<b>79.3</b>	158.7	3.39	10.51	
	"	47.7	154.5	<b>5.08</b>	15.30	

■ パイプ管全閉状態 □ パイプ管2/7開状態

配管部の振動測定値を表4に示す。なお、振動加速度は特に異常がなかったためここでは割愛する。

表4 配管部の振動測定値

測定箇所	測定方向	DISP_RMS (μm)	DISP_PP (μm)	LO_RMS (mm/s)	LO_P (mm/s)	
配 管 部	ポンプ 吐出側	垂直	43.1	<b>220.0</b>	8.87	<b>30.68</b>
		"	24.2	115.2	6.16	<b>20.28</b>
		水平	30.7	142.8	6.13	<b>19.44</b>
		"	44.2	138.6	5.05	<b>20.37</b>
		軸	39.9	<b>186.2</b>	7.36	<b>23.08</b>
		"	47.4	<b>203.8</b>	5.91	<b>17.37</b>
	ポンプ 吐出側	水平	31.3	<b>157.6</b>	5.16	<b>20.56</b>
		"	48.9	<b>150.5</b>	4.77	<b>15.40</b>
		軸	52.5	<b>242.6</b>	7.75	<b>24.20</b>
		"	43.0	<b>190.9</b>	6.31	<b>21.92</b>
	右放出 管内側	垂直	24.9	94.8	2.93	9.70
		"	15.2	56.5	2.15	7.57
	左放出 管内側	垂直	31.1	<b>156.6</b>	4.34	13.58
		"	17.2	70.3	2.74	9.44
	ポンプ 吸引側	垂直	32.7	<b>158.8</b>	6.15	<b>20.23</b>
		"	25.3	116.8	6.45	<b>20.07</b>
		水平	26.9	127.6	4.67	<b>15.18</b>
		"	21.0	100.7	5.16	<b>15.67</b>
	ポンプ 吸引側	軸	41.3	<b>185.9</b>	8.93	<b>28.94</b>
		水平	44.1	<b>201.0</b>	7.07	<b>19.88</b>
	パイプ 管	"	49.7	<b>185.5</b>	5.74	<b>20.50</b>
		水平	29.6	131.0	3.29	9.61
	"	"	41.3	92.9	3.07	11.57

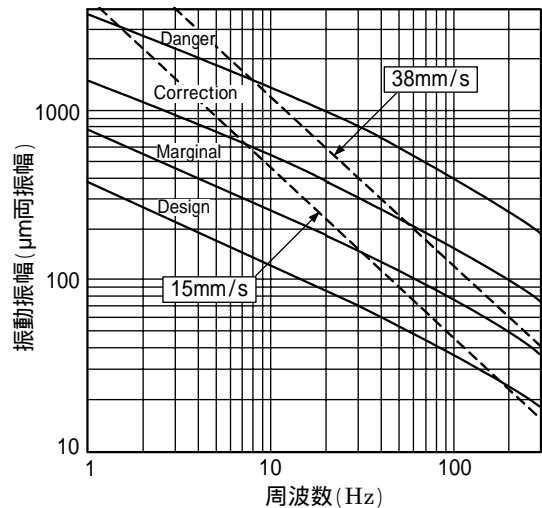


図6 SwRIによる配管振動判定基準

表3,表4に下線付き太字で表示するデータが基準を超えた値である。

バイパス管全閉の状態では,ポンプの駆動側,ポンプ吸引口,ポンプ吐出口ともに振動変位が高かった。バイパス管が部分開の状態では,ほとんどの箇所が緩和できたが,ポンプ吸引口の軸方向とポンプ吐出口の垂直方向のみがより高かった。配管部では,全体的に入出口の周辺, , の振動変位と振動速度が高く,入出口から離れるほど振動値が下がる傾向にあった。特に入出口の流速に沿った方向,つまりポンプ吐出側の垂直方向とポンプ吸引側の軸方向,ポンプ吸引側の水平方向の振動値が最も高かった。

また,図7に測定箇所ポンプ吸引口の軸方向の振動FFT波形を,図8に測定箇所ポンプ吐出口の垂直方向の振動FFT波形を示す。図9に測定箇所ポンプ吐出側配管の垂直方向FFT波形を,図10に測定箇所ポンプ吸引側配管の水平方向FFT波形を示す。各箇所の振動波形を観察した結果,振動成分が100Hz以下のランダムな低周波数成分であり,機械的な異常により励起する振動の特徴は現れていない。

### 3.3.3 診断結果と対策提案

上記の測定結果により,以下の診断結果を推定した。

ポンプの吸引と吐出口およびその周辺の配管振動が高くなっているのは,流体により励起した振動だと考えられる。

振動を励起した原因は,吸引口と吐出口に設置されているフレキシブル管にある。これは熱膨張の吸収と,回転機から配管への振動を遮断するため,また,心出しを省くために設置した。しかし,大流量吸引と高圧吐出流体のエネルギーで振動が増幅され,さらに,フレキシブル管の内面の凹凸により乱流が発生し,異常振動を励起したものと考えられる。

次に,振動を抑えるために以下の対策を提案した。

- 1) 40 の温水による配管の膨張量は許容範囲内であり,回転機基礎の振動も小さかったため,吸引口と吐出口のフレキシブル管を取り除き,心出しをした上でポンプに直接配管を接続する。
- 2) 配管サポートの追加と補強をする。
- 3) 水の循環プロセスに影響の無い範囲で,ポンプの効率を上げるためできるだけ配管内部の圧力を0.4MPa位まで下げて運転する。そのために,バイパス管の放流口を改造して適正に放流する。

### 3.3.4 対策および結果

前項の対策提案を実施した。

表5と表6に対策後の回転機本体部および配管部の振動値を示す。全箇所の振動が全て基準内に収まり,騒音も緩和でき,正常運転となった。

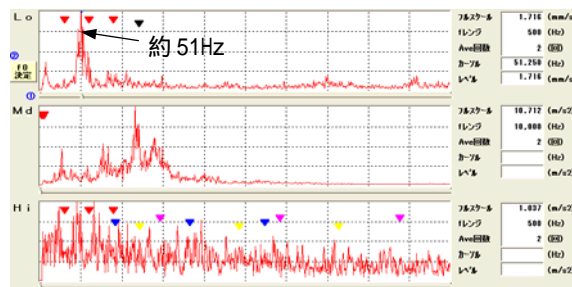


図7 箇所ポンプ吸引口の軸方向振動FFT

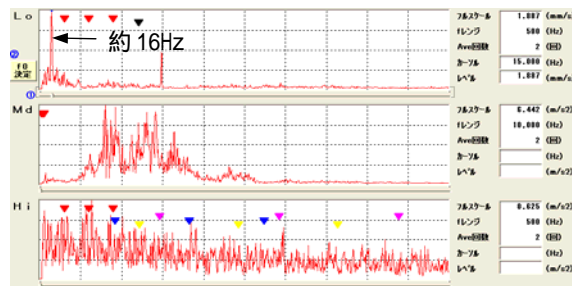


図8 箇所ポンプ吐出口の垂直方向振動FFT

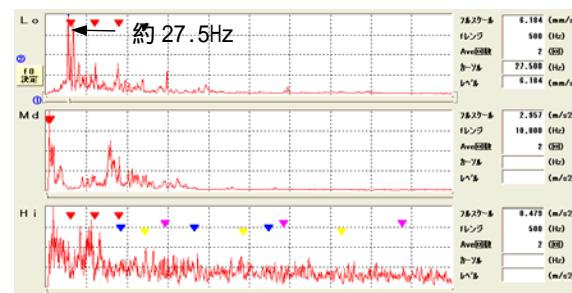


図9 箇所ポンプ吐出側配管の垂直方向振動FFT

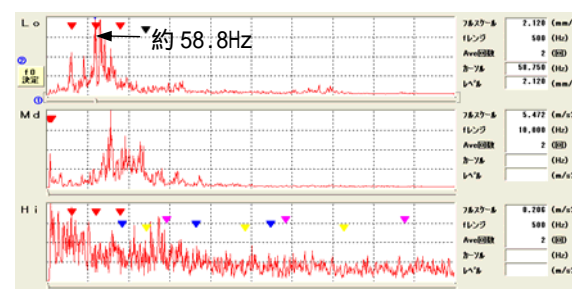


図10 箇所ポンプ吸引側配管の水平方向振動FFT

## 4. おわりに

配管に異常振動が起きた場合,配管系統の構成や周囲設備の性能を十分調査して把握する。さらに,その振動の形態および振動の伝播ルートを明らかにし,振動を励起する真の原因を見つけることが最適な振動低減対策を立案するために重要である。

表5 回転機本体部対策後の振動測定値

測定箇所	測定方向	DISP_RMS (μm)	DISP_PP (μm)	LO_RMS (mm/s)	LO_P (mm/s)	
回転機本体部	モーター反駆動側	垂直	18.0	66.1	1.14	3.51
		水平	8.5	43.5	1.56	4.98
		軸	7.0	30.5	1.3	4.92
	モーター駆動側	垂直	4.7	19.9	0.98	3.8
		水平	10.5	40.6	1.34	4.41
		軸	16.5	47.1	1.31	4.05
	ポンプ駆動側	垂直	39.7	79.4	1.5	4.9
		水平	38.8	84.4	1.53	4.97
		軸	39.7	79.4	1.59	5.82
	ポンプ吸引口	垂直	39.3	79.5	1.64	4.81
		水平	33.8	74.6	1.43	5.56
		軸	39.7	80.6	1.45	5.56
ポンプ吐出口	垂直	39.8	79.8	1.61	4.68	
	水平	40.6	80.8	1.51	5.4	
	軸	39.8	79.8	2.16	7.05	

参考文献

- 1) 馮芳：循環水配管振動調査報告，研究報告，高田工業所（2007）
- 2) 井土久雄：配管の振動，メンテナンス，No.246，pp.18-23（2006）
- 3) 馮芳，劉信芳：振動信号による送風機の状態診断および整備対策，高田技報，Vol.19（2009）
- 4) ISO 基準に基づく機械設備の状態監視と診断（振動カテゴリ），振動技術研究会，(2005.9)
- 5) ファン・コンプレッサーの本 振動技術研究会，(2005.9)
- 6) ポンプの本，日本プラントメンテナンス協会，（1994）
- 7) Wachel, J.C. & Bates, C.L., Hydrocarbon Processing, pp152-156(1976)



馮 芳 Hou HYOU  
 (株)高田工業所 技術本部 技術部  
 保全技術企画グループ  
 主任研究員 情報工学博士

表6 配管部対策後の振動測定値

測定箇所	測定方向	DISP_RMS (μm)	DISP_PP (μm)	LO_RMS (mm/s)	LO_P (mm/s)	
配管部	ポンプ吐出側	垂直	18.5	69.4	1.84	6.07
		水平	39.7	79.6	2.21	7.25
		軸	36.5	77.9	2.57	9.36
	ポンプ吐出側	水平	34.8	75.4	2.52	8.4
		軸	45.4	96.7	2.62	10.51
	右放出管内側 垂直		33.8	100.9	2.27	7.39
	左放出管内側 垂直		44.8	102.5	2.93	11.62
	ポンプ吸引側	垂直	40.5	81.0	1.59	4.98
		水平	36.0	76.4	1.46	5.05
		軸	39.0	79.5	1.89	7.57
	ポンプ吸引側 水平		39.7	79.4	1.89	6.58
	パイプ管 水平		39.7	80.3	2.34	8.33