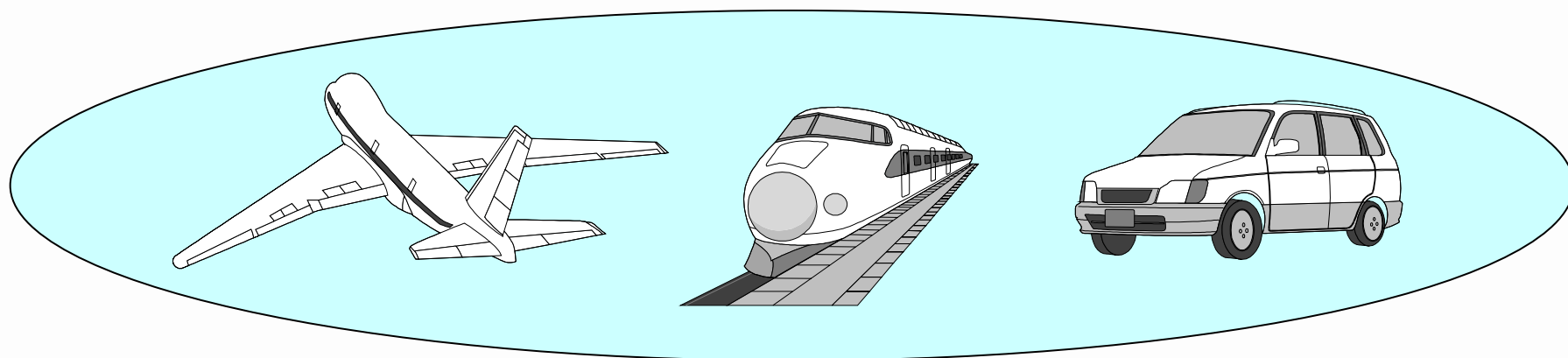


1. 振動測定の基本

振動とは

「ある座標系に関する量の大きさがその平均値又は基準値よりも大きい状態と小さい状態とを交互に繰り返す変化。通常、時間に対する変化である。」(日本工業規格(JIS)より引用)



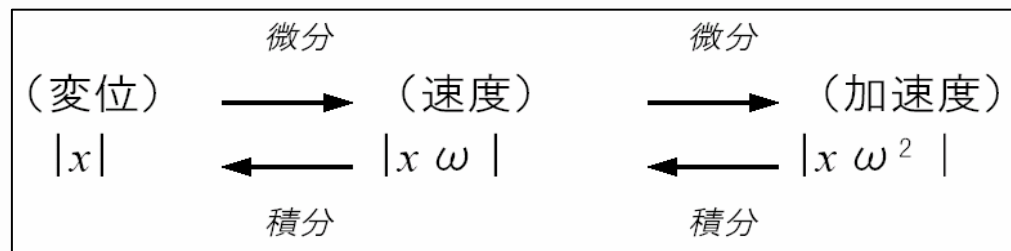
機械振動	品質検査、作業安全
公害振動	乗り物、体感振動
設備振動	建物、プラント

振動の表し方

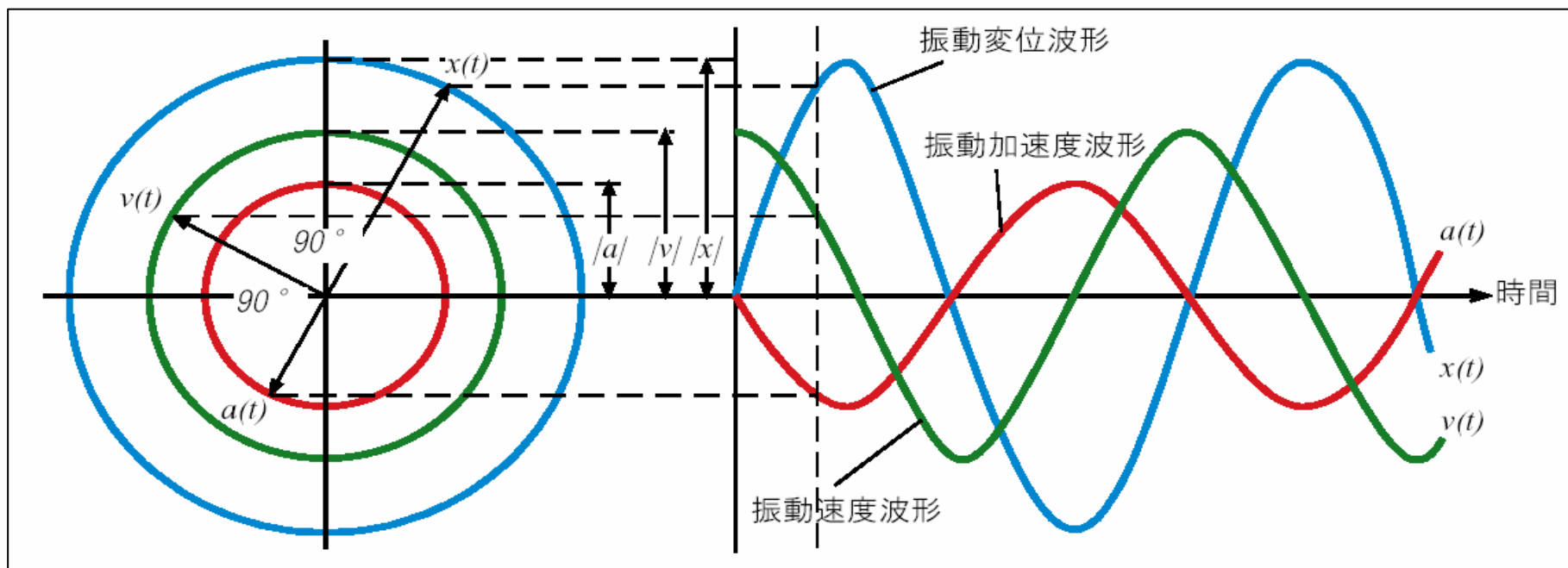
変位: $x(t) = X \sin(\omega t)$

速度: $v(t) = X\omega \cos(\omega t)$
 $= X\omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$

加速度: $a(t) = -X\omega^2 \sin(\omega t)$
 $= -\omega^2 x(t)$

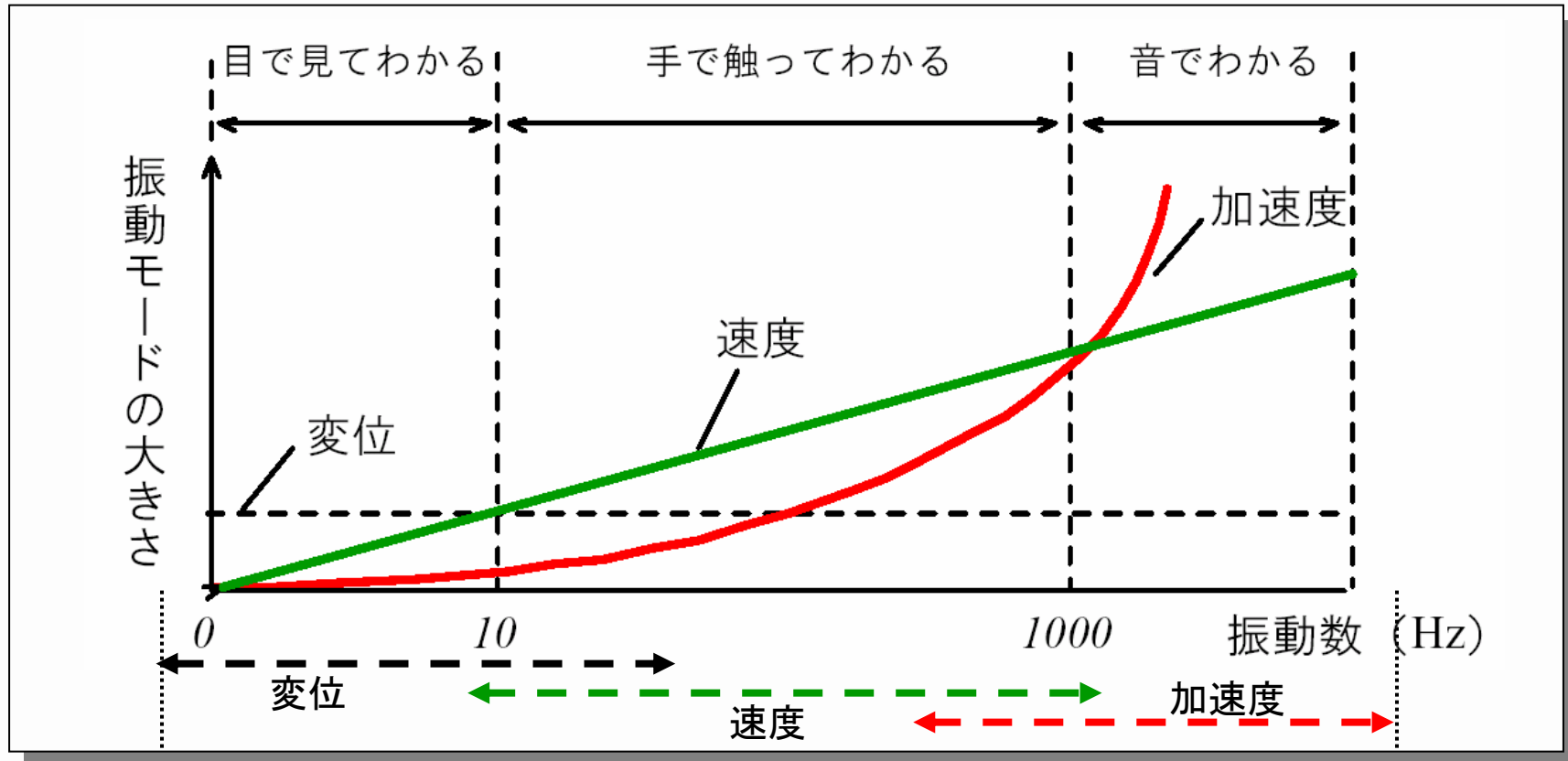


ω : 角周波数 ($=2\pi f$)



振動と人間の感覚 変位が周波数に対して一定である場合

万能なセンサはない→センサ、計測器を選ぶ



異常音の種類	変位量又は動きの大きさそのものが問題	振動エネルギーや疲労度が問題	衝撃力などのように力の大きさが問題
測定対象	工作機械のビビリ現象 弾性軸の高速回転機械	一般の回転機械の振動ベルト 装置などの振動	軸受けの傷振動 歯車の傷振動

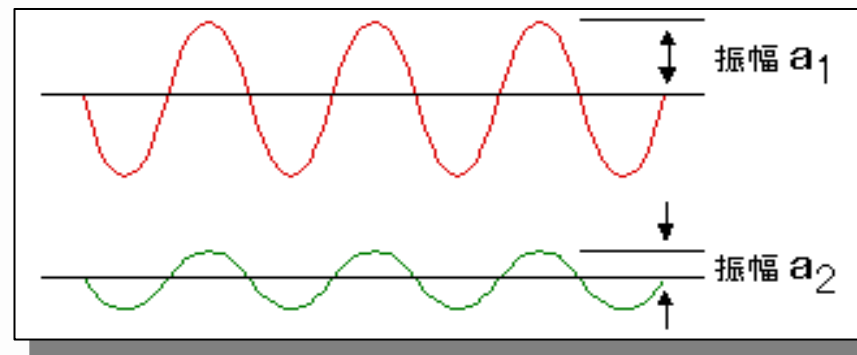
波形の表し方 < 振幅 >

振幅は波形の大きさを表します。

音で考えると、大きな音は大きな振幅を持っています。

物理的現象は、たとえば振動は振動計、音は騒音計、力は荷重計、圧力は圧力計というように、各種センサで検出します。

その信号は、物理量の大きさに比例した電圧の振幅値として出力されます。FFTアナライザーの時間軸波形表示やオシロスコープによる測定は、この電圧出力の時間経過を観測していることとなります。

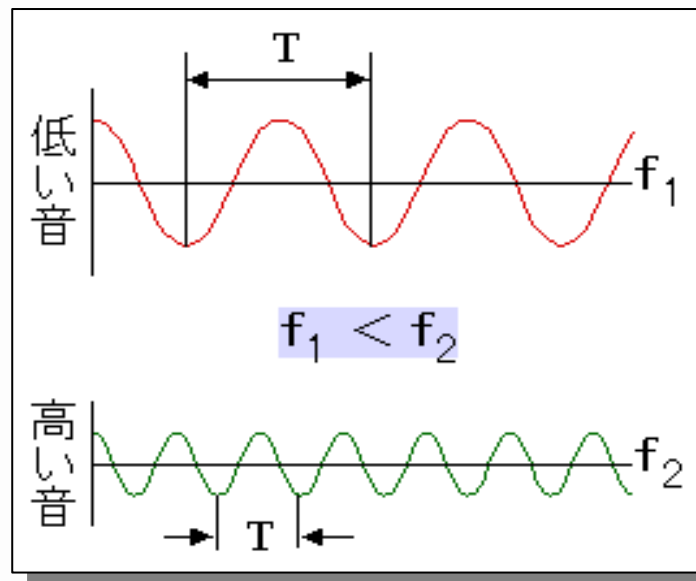


波形の表し方 <周波数>

周波数とは、1秒間に繰り返される波の回数を表し、単位は Hz です。
周波数を f 、周期を T とすると次の関係があります。

$$f = 1 / T$$

音で考えた場合、周波数の高い波形は高音、周波数の低い波形は低音に相当します。



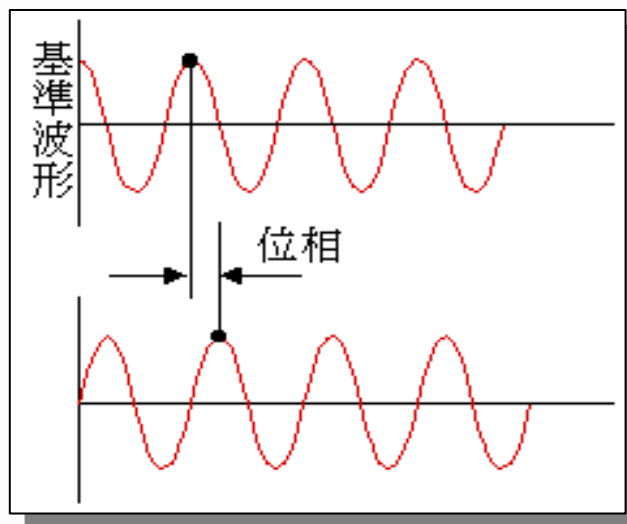
波形の表し方 <位相>

波の1周期は、角度で360度あるいは 2π radianと表します。

説明には、「度」が使われますが、数式表現では、一般的に「radian」が使用され、“rad”と表記されます。

同じ周波数の波形でも、ある時点(瞬間)ではピーク位置がずれています。

このピーク位置のずれを、基準波形に対して表現したものが位相です。基準波形に対してピークが遅れている時をマイナス、進んでいる時をプラスで表現します。

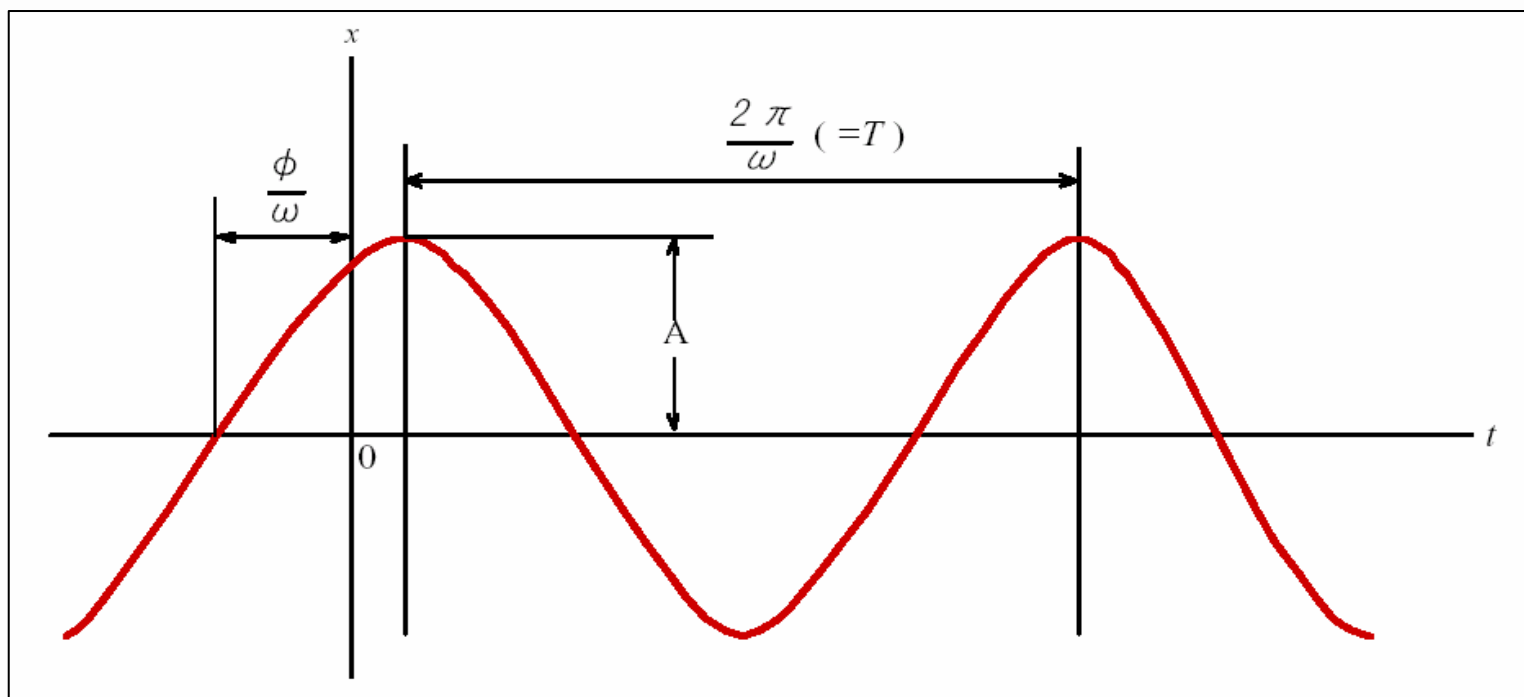


振動波形の3要素

周波数(振動数)	Hz	f
周期=1/周波数	s(秒)	T
振幅	m/s ² 、G、Gal	A
位相	ラジアン	$2\pi ft + \Phi$

$$x = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

ϕ : 初期位相
 ω : 角周波数 ($=2\pi f$)



振動振幅のパラメータ

(1) 平均値 (mean value)

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

(2) 絶対値平均値 (average value)

$$|\bar{x}| = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$

(3) 自乗平均値 (mean square value)

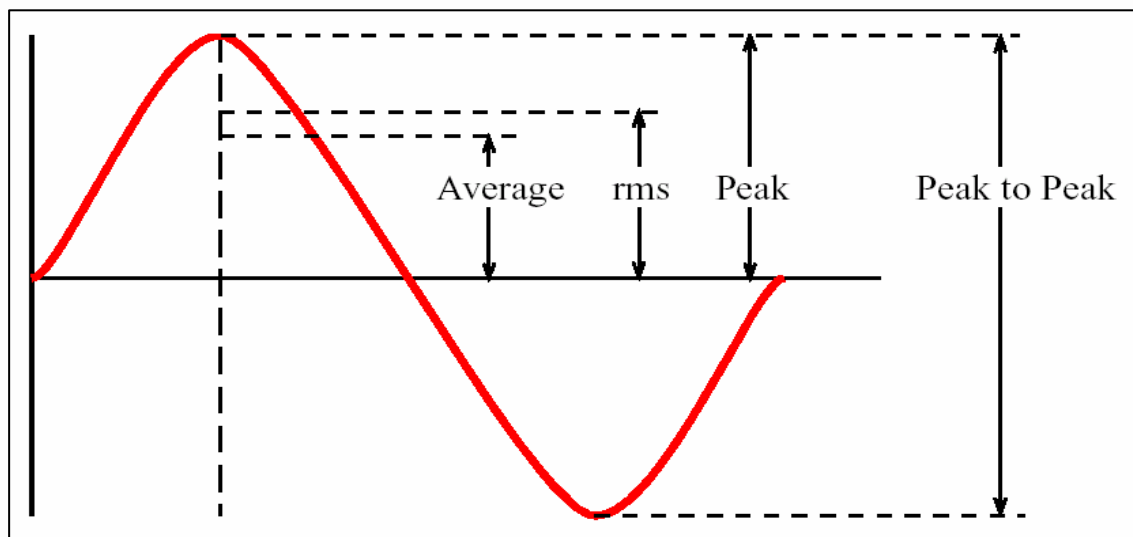
$$\overline{x^2} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt$$

(4) rms値 (root mean square)

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt}$$

(5) 波高率 (crest factor)

$$F_c = \frac{x_{peak}}{x_{rms}}$$

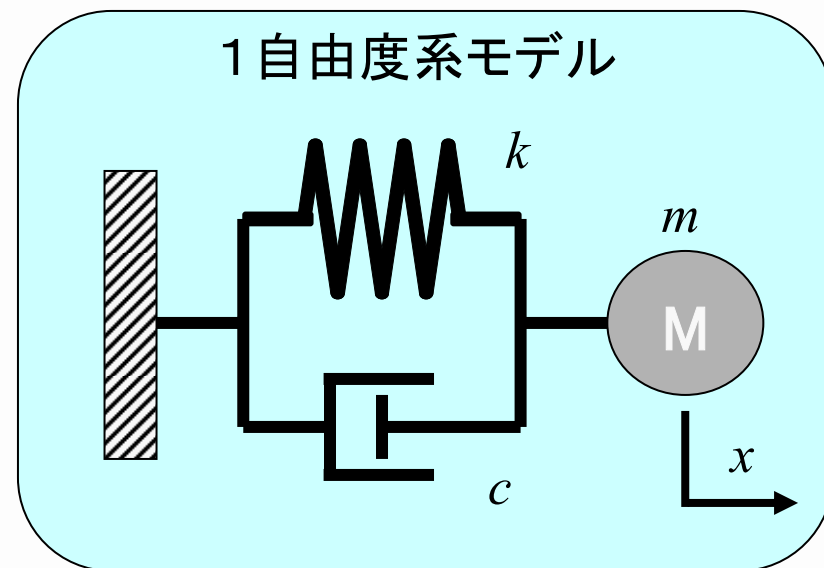


正弦波の場合

$$\begin{aligned} \text{rms/Peak} &= \frac{1}{\sqrt{2}} = .707 \quad (= 1/F_c) \\ \text{Average/Peak} &= 2/\pi = .637 \\ \text{Peak-to-Peak} &= 2 \times \text{Peak} \\ \text{rms/Average} &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad (\text{波形率}) \end{aligned}$$

振動物体の基本性質

- (1) ばね
変位に対する抵抗力の大きさ $f = k x$
- (2) ダンパ
速度に対する抵抗力の大きさ $f = c v$
- (3) 質量
加速度に対する抵抗力の大きさ $f = m a$



物質の基本性質:「そのままでもいい」

	性質の強さ	変化	抵抗力	物質
状態	質量(m)	加速度 a	慣性力 $f = - m a$	すべて
形	剛性(k)	変位 x	復元力 $f = - k x$	固体
位置	粘性(c)	速度 v	粘性抵抗力 $f = - c v$	流体又は流体中の固体

減衰とも

固有振動数

固有振動数とは、アンテナや回路、あるいは力学系において、共振周波数となる振動数のこと

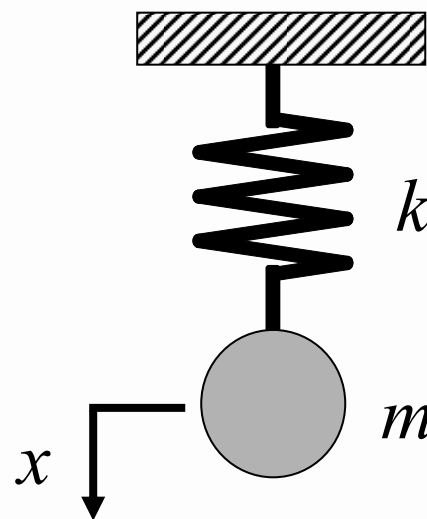
弾性定数 k のバネに結ばれた質量 m の質点の運動方程式と解は、次のようになります。

$$m\ddot{x} = -kx$$

$$x = A \sin(2\pi f_n t + \phi)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

f_n : 固有振動数



m : 質量

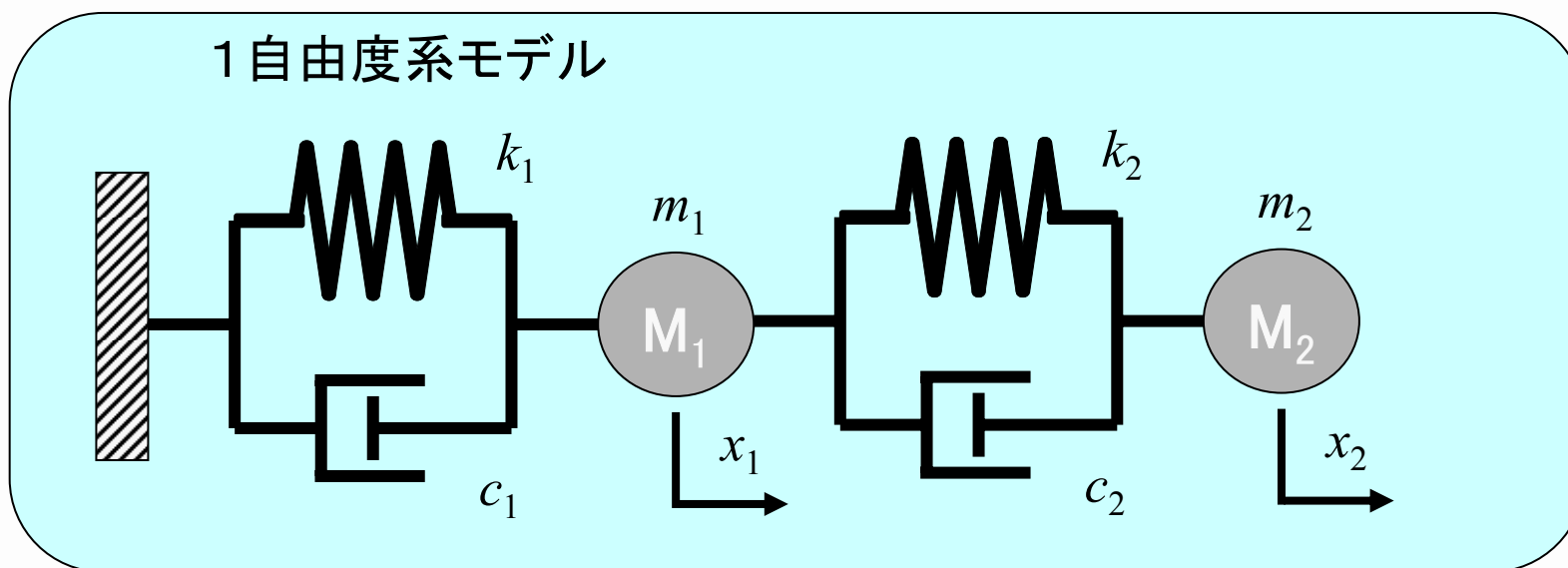
k : ばね

x : ばねの自然長からの変位

1自由度系と多自由度系

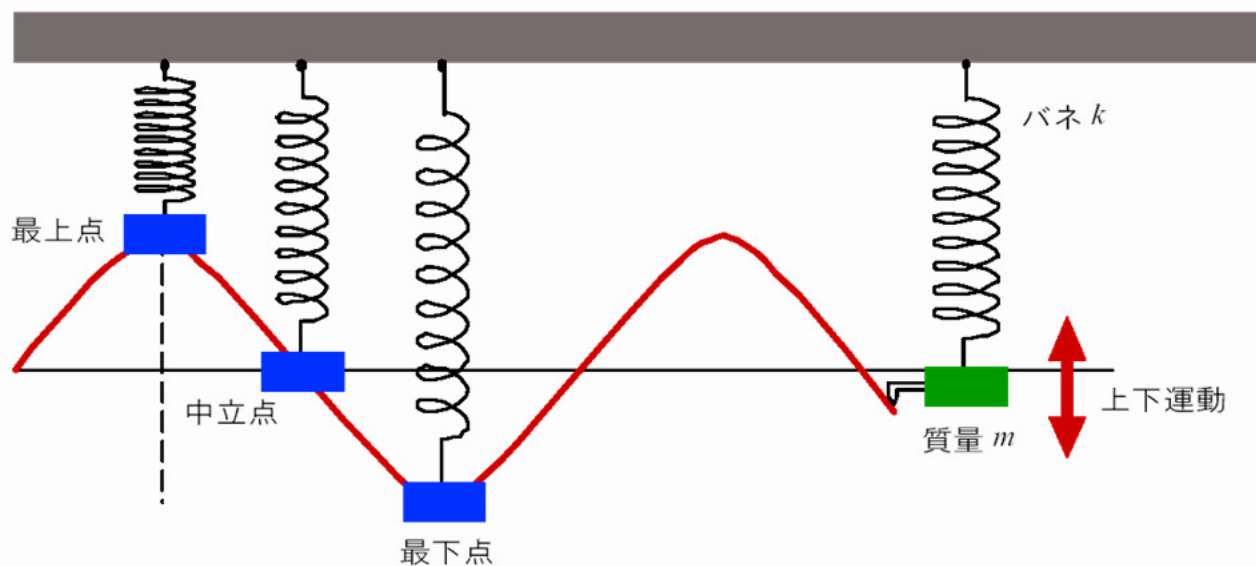
実際の構造物を1自由度系で精度よくモデル化できる例は、あまり多くない。

しかし、
すべての多自由度系は、モード解析を使うことによって、1自由度系で表現することができる。



質量とばねからなる機械系を加振する正弦波の振動

(単振動)する→系の固有振動



$$x = A \sin(2\pi f_n t + \phi)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

固有振動数

振動センサの種類と測定対象

非接触式	接触式
渦電流式 変位 静電容量式 変位 光学式 変位/速度	圧電式 加速度 歪みゲージ式 サーボ式 加速度

物理量	測定対象	方式	センサ
加速度	<ul style="list-style-type: none"> ・振動一般 ・高周波数帯域 ・回転機械の軸受 	接触	圧電式ピックアップ
速度	<ul style="list-style-type: none"> ・小型振動体(水晶、 圧電素子、光PU、HD) ・回転機械振動 	非接触	レーザードップラー振動計
変位	<ul style="list-style-type: none"> ・低周波数帯域 ・回転軸(面)の振れ 	非接触	静電容量式変位計 渦電流式変位計 レーザー式変位計

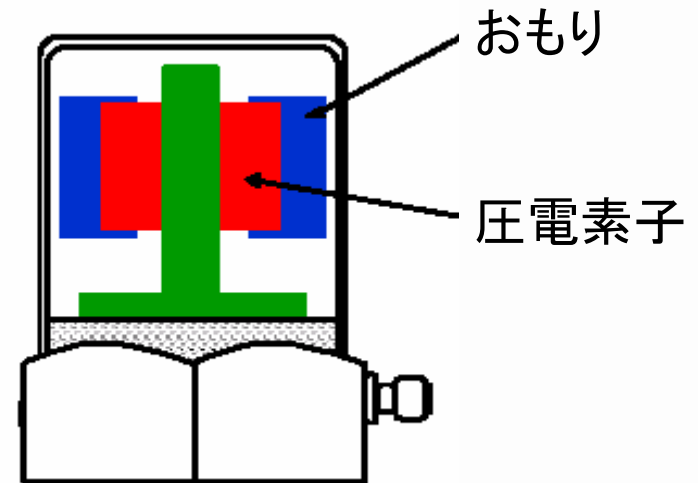
圧電式加速度ピックアップ

特徴

- ・もっとも汎用的な振動センサ
- ・コンパクトで丈夫
- ・安定性が高い
- ・可動部が無く磨耗のおそれが少ない
- ・周波数範囲が広い
(0.1~40kHz)
- ・ダイナミックレンジが広い
(測定範囲: $10^{-3} \sim 10^4$ m/s²)

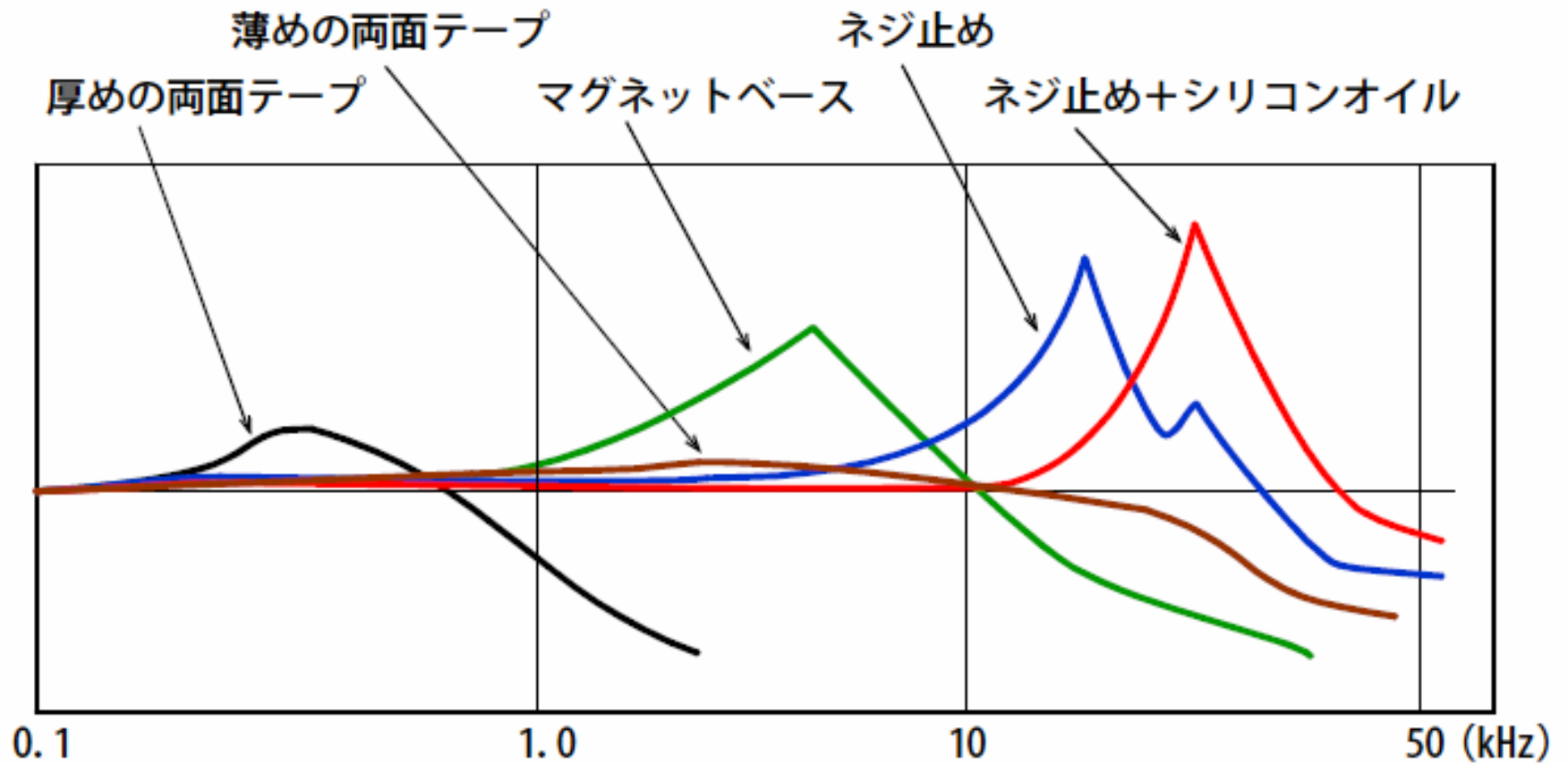
使用上の注意点

- ・DCからの測定不可
- ・取り付け方法による周波数特性の低下
(接触共振)
- ・質量付加効果(1/10で、約4%の誤差)



圧電式ピックアップの構造

センサの固定方法による周波数特性の変化



センサ固定方法による周波数特性

振動センサの選択 ～精度良く検出するために～

① 対象とする物理量は、変位、速度、加速度？

② 測定対象物の大きさ

センサには、接触式と非接触式のタイプがあります。接触式センサを使用する場合には、質量効果(後述)について、また、接触・非接触に関わらず、センサの測定必要面積 S と対象とする測定物の面積 S' について考慮する必要があります。($S'/S > 1$ でないと正確な計測は不可能です。)

③ 対象物の振動の大きさ、周波数範囲

測定対象の振動の大きさ、周波数範囲のおおよその目安を求めておく必要があります。ここでの目安を誤ると、場合によっては、センサを破損する可能性があります。

④ 測定環境 測定対象並びに周囲環境の温度、湿度や、埃、油、水の存在の有無

測定方式によって得手・不得手があります。

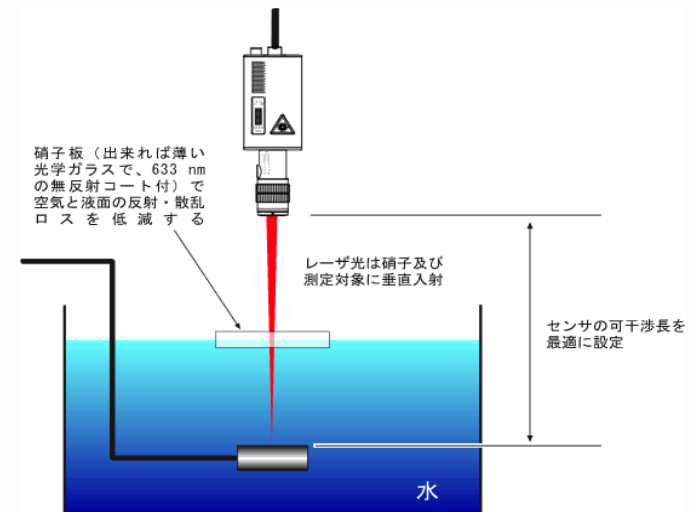
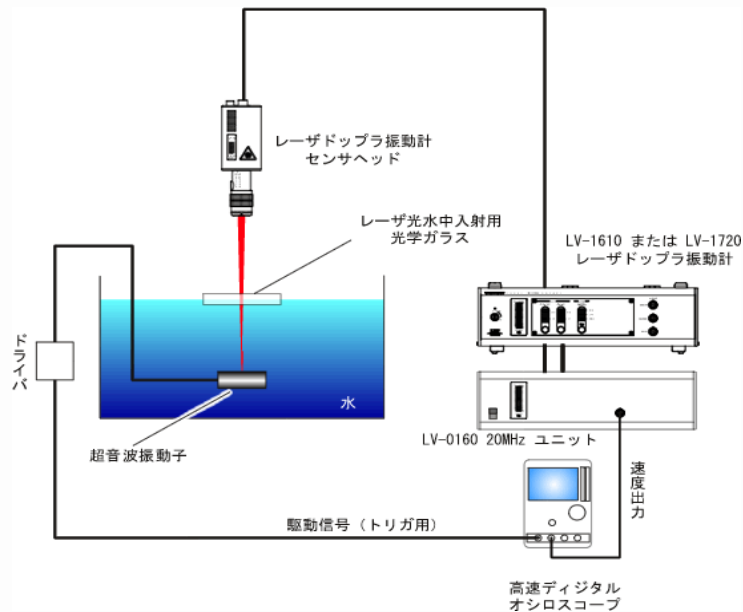
センサの選択例

測定方式		静電容量式	渦電流式	レーザドップラ式	圧電素子		電磁式	
製品型名		VEシリーズ	VSシリーズ	LVシリーズ	NP-2000シリーズ(電荷出力)	NP-3000シリーズ(アンプ内蔵)	MP/PDシリーズ(1センサタイプ)	(2センサタイプ)
	非接触測定	○	○	○				
分類	直線振動	○	○					
	ねじり振動						○	○
物理量	変位測定	○	○					
	速度測定			○			○	○
	加速度測定				○	○		
周波数	低周波	◎	◎	○	○	○	○	○
	高周波	○	○	○	◎	◎		
	超高周波			◎				
振幅	大振幅	○	◎					
	微小振動			◎	○	○		
環境	高温環境				○			
	粉塵		○					

レーザードップラ振動計 速度センサ(1/2)

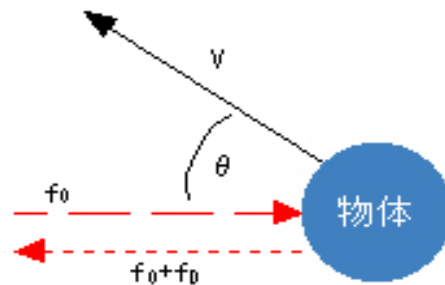


<p>優位点</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・非接触測定 ・測定ダイナミックレンジが広い ・空間分解能が高い ・センサヘッドが小型
<p>注意点</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・センサヘッドをターゲットに正対させる必要がある ・レーザビームの反射光量の確保 ・ターゲット上の油・水の影響を受ける ・回転体の計測には注意が必要（表面粗さによるノイズの影響）



レーザドップラ振動計 速度センサ(2/2)

$$f_D = \frac{2V_z}{\lambda}$$
$$V_z = V \cos \theta$$



f_0 : レーザ光の周波数
 f_D : ドップラ周波数
 λ : レーザ光の波長 (0.6328 μm)
 V : 物体の速度

ある一定の周波数成分を持つ音波や電波あるいは光波を、ある速度で移動している物体に当てると、移動物体の持つ速度成分に比例して周波数が変化します。

これをドップラシフトあるいはドップラ効果と呼びます。この時、放射した周波数と反射して戻ってきた周波数の間には次の関係が成り立ちます。

物体が近づいてくる場合 放射周波数 < 反射周波数

物体が遠ざかる場合 放射周波数 > 反射周波数

放射周波数と反射周波数の差は、物体の移動速度に関係し、一般に速度の上昇に伴い周波数の差が大きくなります。

レーザドップラ振動計はこの原理を使用しています。

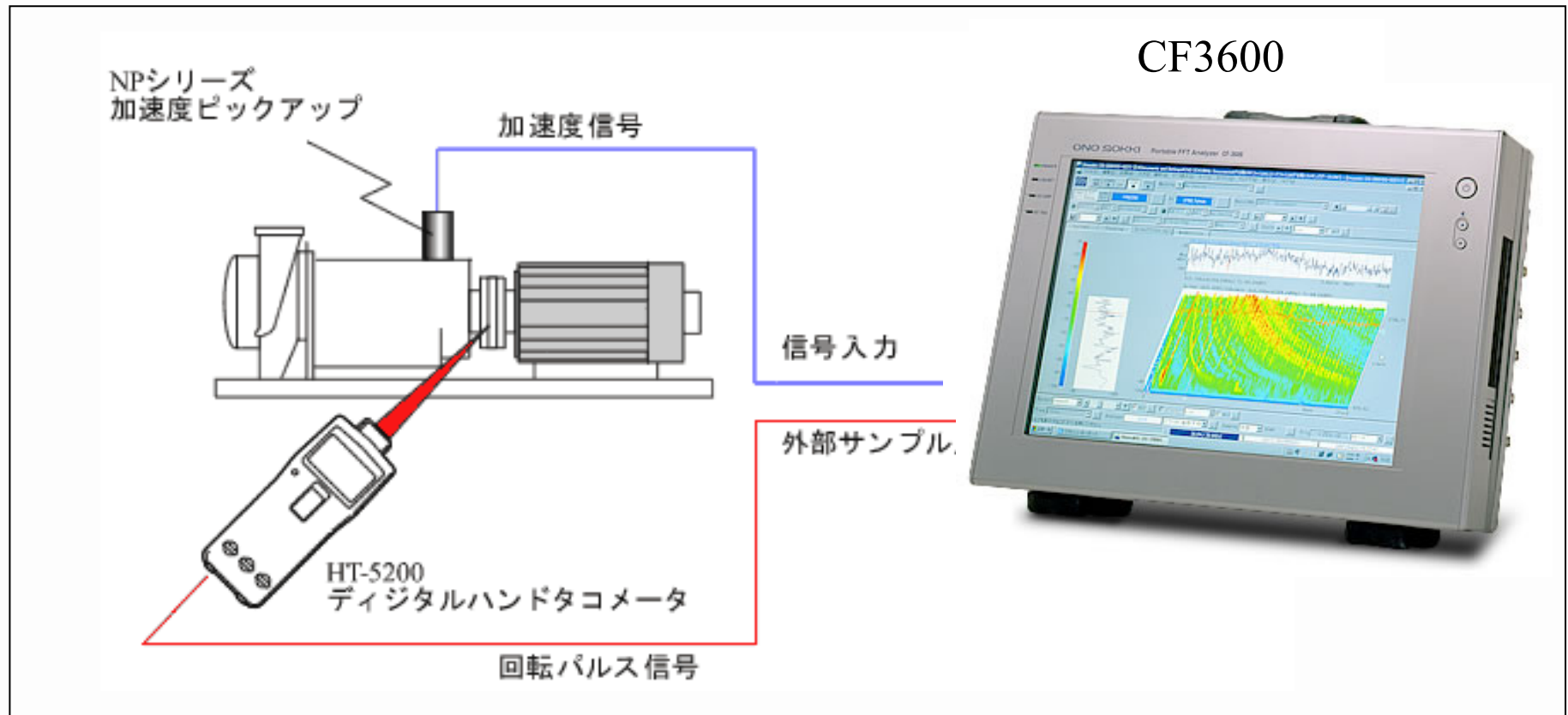
レーザ光を移動するターゲットに照射すると、ターゲットからの反射光の持つ周波数はドップラ効果によって照射光が本来持つ周波数からドップラシフトします。この時のドップラシフト量についてみると、シフトした周波数を f_D 、ターゲットの持つ速度を V 、照射光の波長を λ 、照射光を当てる方向とターゲットの移動方向とのなす角度を θ とすると、次の式が成立します。ここで、レーザの照射光の周波数を f_0 とすると、反射光の持つ周波数は $f_0 + f_D$ となります。レーザドップラ振動計で使用されるレーザ光の波長 λ はきわめて安定しているため、ドップラ周波数 f_D とターゲットの移動速度 V は比例関係にあります。また、レーザドップラ振動計ではレーザを照射する方向とターゲットの移動方向とのなす角度 θ は通常0度と設定するため（入射光に対する反射光の平行成分のみを検出：面外振動*）、ドップラ周波数 f_D を測定することでターゲットの持つ照射方向の移動速度を求めることが出来ます。ただし、レーザ光そのものの周波数は極めて高く、直接測定することが困難なため、通常ドップラ周波数 f_D の検出は、照射光 (f_0) と反射光 ($f_0 + f_D$) とを干渉させて検出します。

振動解析手法

転がり軸受の振動測定 - 1

設備機器等の損傷は早期に発見出来れば軽微で済む。転がり軸受の異常振動をFFTアナライザで周波数解析を行い、軸受に損傷が発生しているかどうかを診断する。

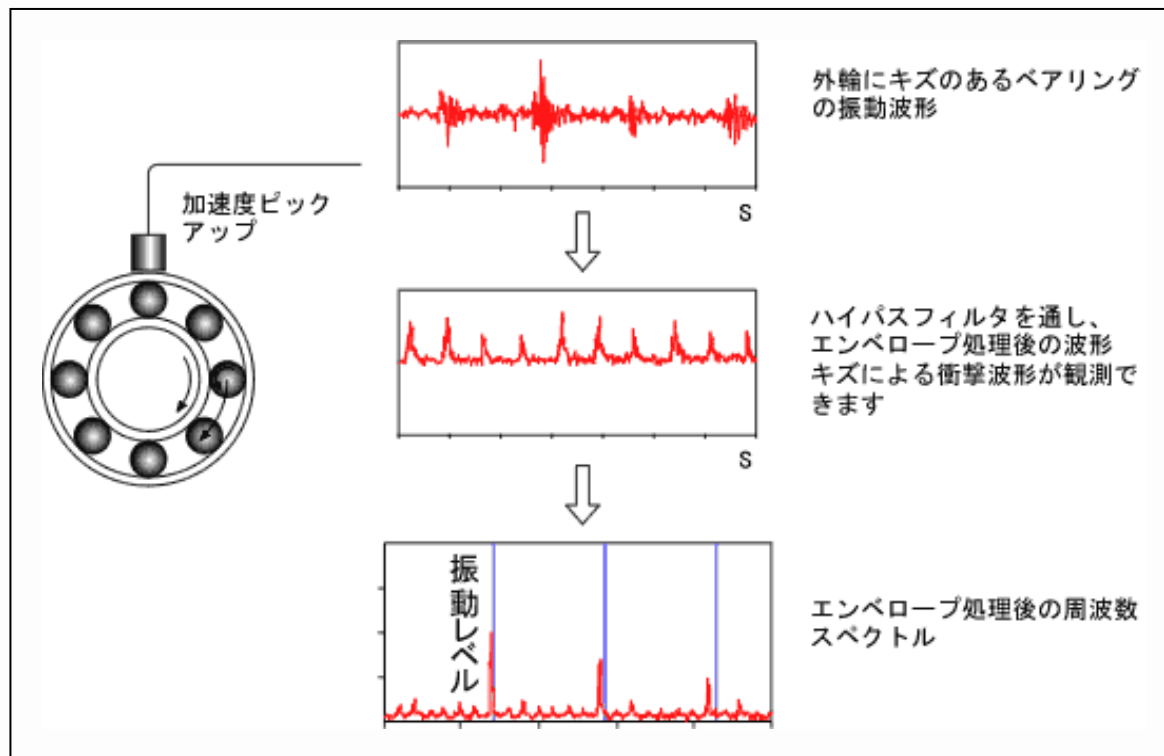
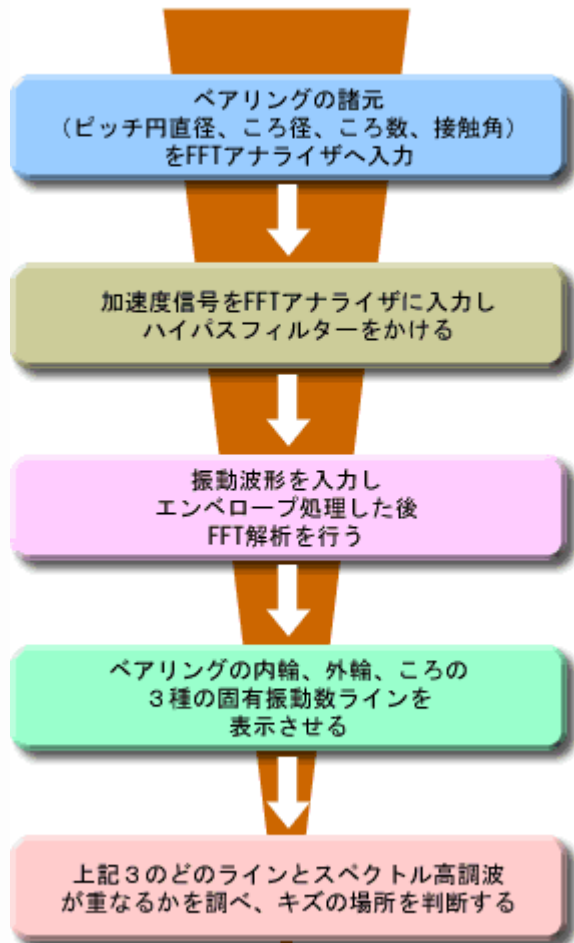
転がり軸受の固有振動信号をフィルタリング・エンベロープ処理することで、傷による発生周期を計測することができる。



振動解析手法

転がり軸受の振動測定 -2

測定の流れ



上図スペクトル波形が、軸の回転数とベアリング仕様から外輪にキズがある場合の周波数(カーソル線:青)と一致しているため、異常振動の原因はベアリングの外輪のキズによることが判断できる

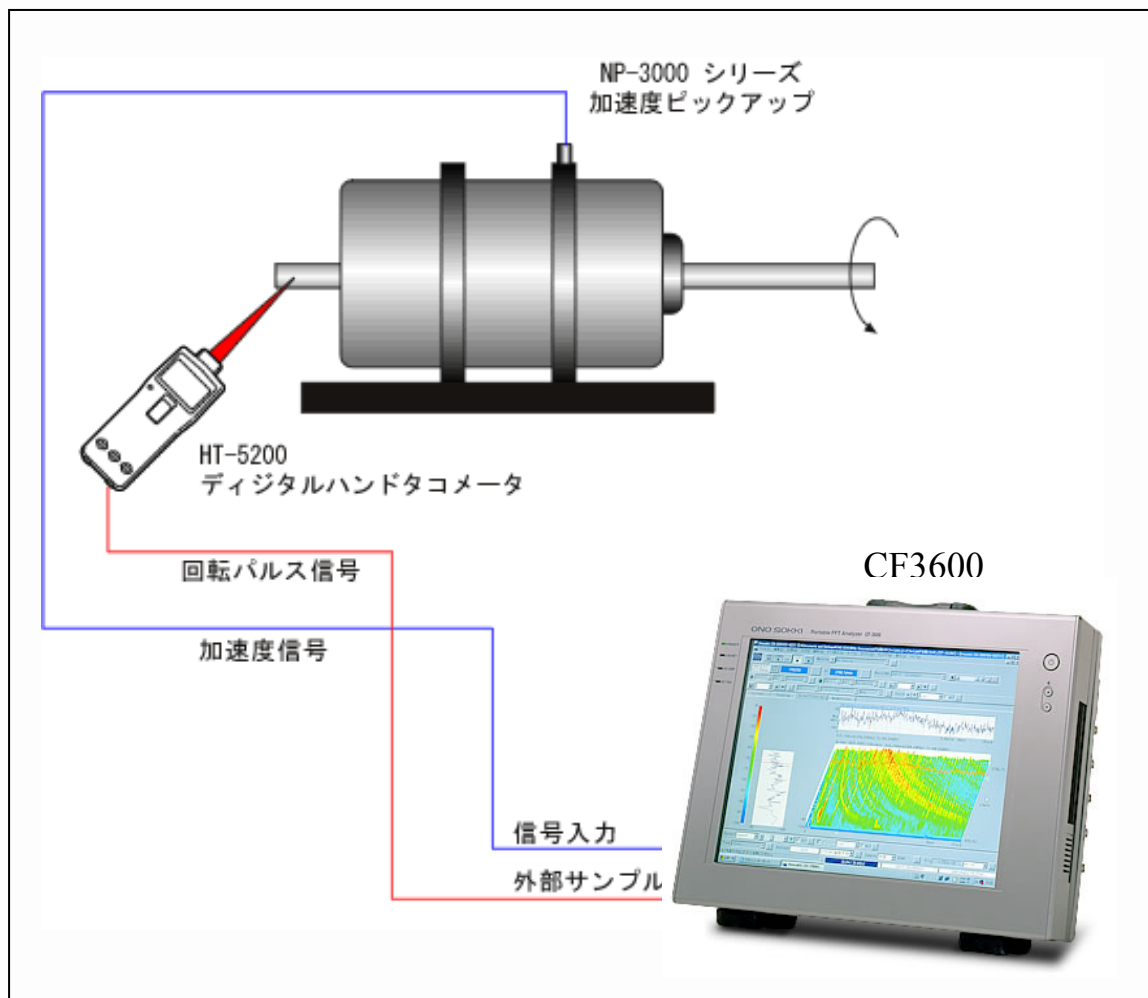
振動解析手法

掘削機の回転アンバランス計測 - 1

掘削機のアンバランス振動を計測する。アンバランス振動が生じると回転軸が破損し大変危険な為、定期的に管理する必要がある。

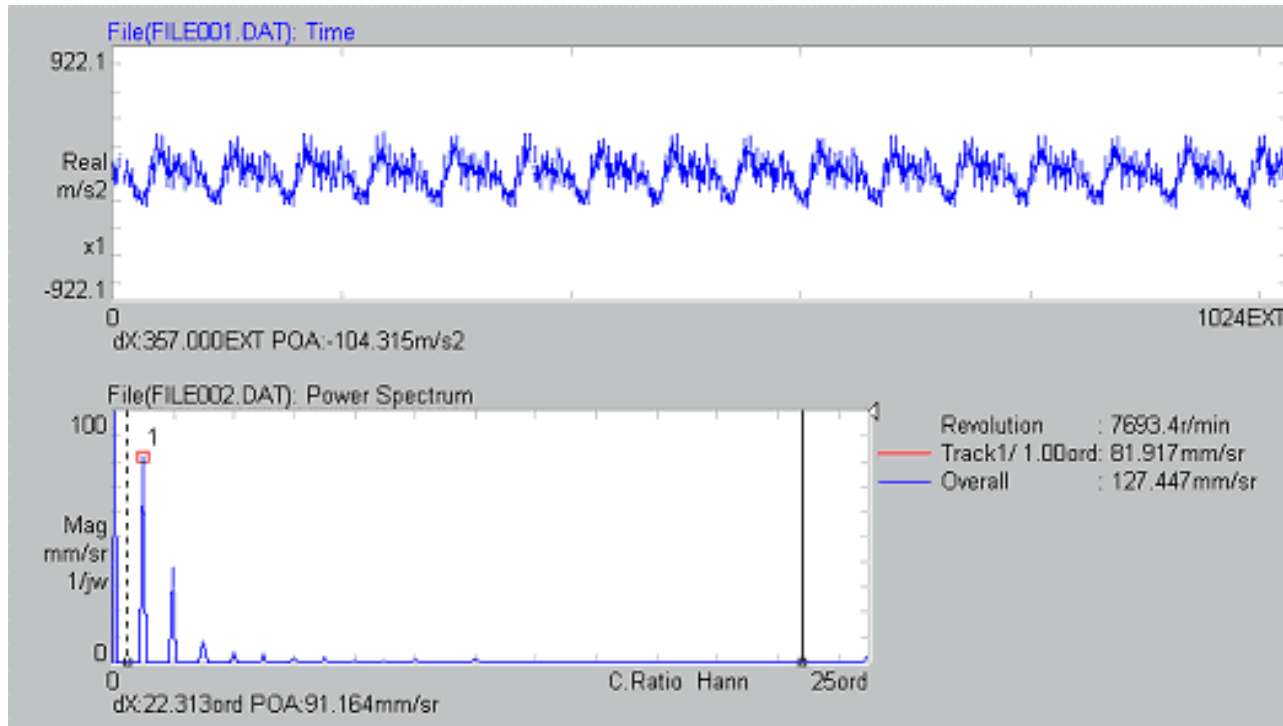
回転検出器として デジタルハンドタコメータを使用して回転軸の回転パルスを拾い、FFTアナライザの外部サンプルパルスに入力する。

アンバランスは**回転1次振動**に着目するため、FFTアナライザで、回転パルスを外部サンプルクロックとして、1次の振動値を比較計測する。なお、加速度信号を一回積分し、振動速度にて計測を行っている。



振動解析手法

掘削機の回転アンバランス計測 -2



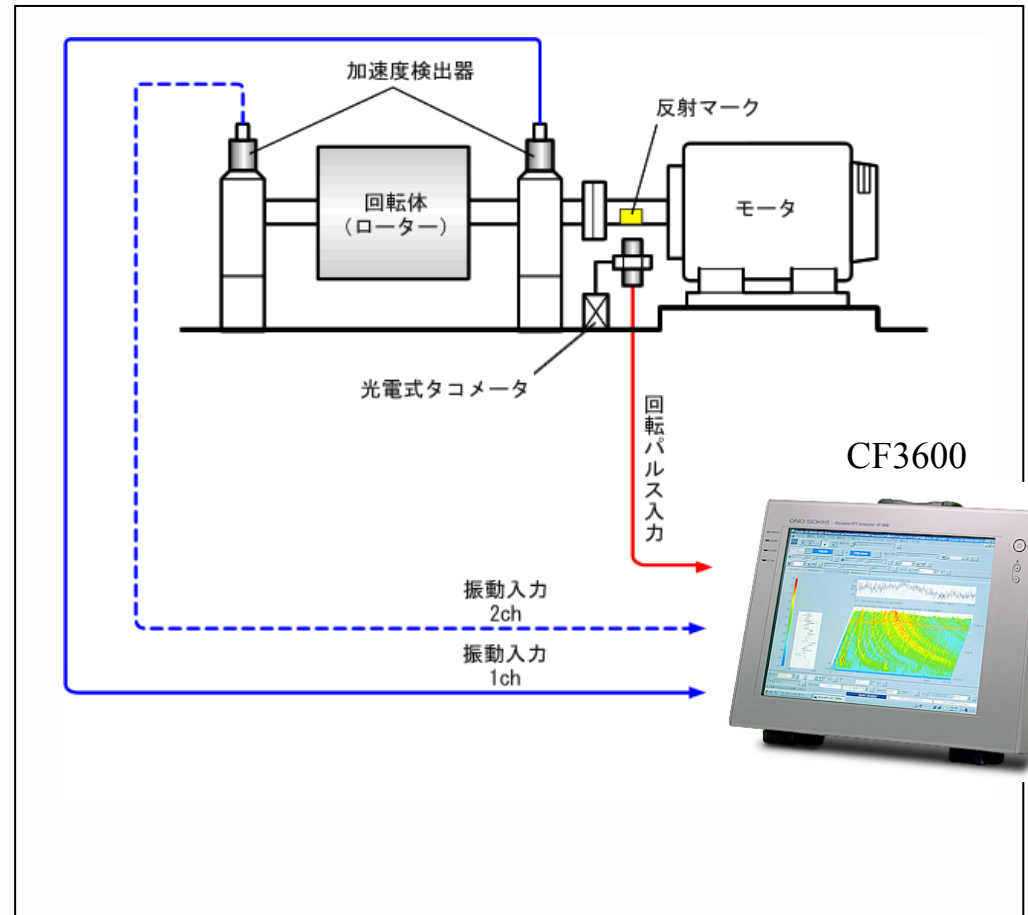
上図は、掘削機に回転アンバランス振動が生じた時のデータである。アンバランスが生じると、回転1次の振動が大きくなる。この例では、初期値約 5 mm/s に対し、81.9 mm/s で 16.3 倍の値を示している。一般的に、目安として 1000 Hz 以下の速度、変位信号の場合、初期値(良好の状態)の約3倍を注意レベル、9倍を危険レベルとしている(ISO 2372 参照)。

振動解析手法

フィールドバリランシング(一面一条件) - 1

回転機械の異常原因としては、アンバランスによることが最も多いといわれている。そのためバランス修正作業は不可欠であるが、従来のベクトル図の作成による方法ではベクトル計算や作図に時間がかかり、現場で行うことは大変だった。ここに紹介するフィールドバリランシング装置は面倒な計算を内部で演算し結果表示するため、短時間に誰でも容易にバランス修正作業が行え、作業効率アップに役立つものである。

回転アンバランスが生じると回転1次の振動が大きくなる。またアンバランスが生じたまま回転数を変化させると共振を起こす。ここでは最も基本的な1面1条件の修正方法について紹介している。

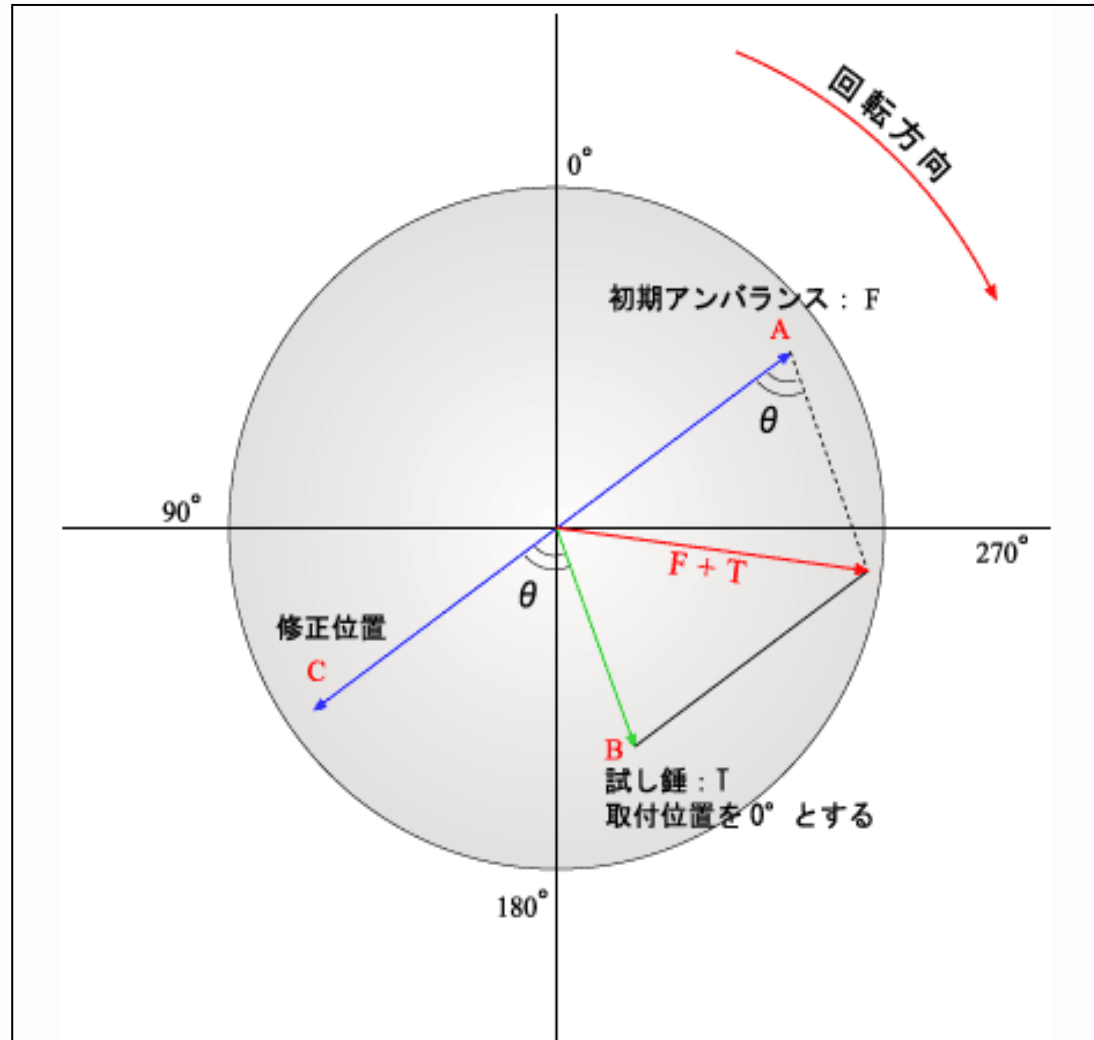


フィールドバリシング(一面一条件)-2

フィールドバリシングの基本的な考え方は右図のようになる。

今、回転平面上のAポイントにFというアンバランスが生じているとする。修正ポイントはAから180° 対向したCポイントにFと同量の修正錘を付ければ良い事になる。

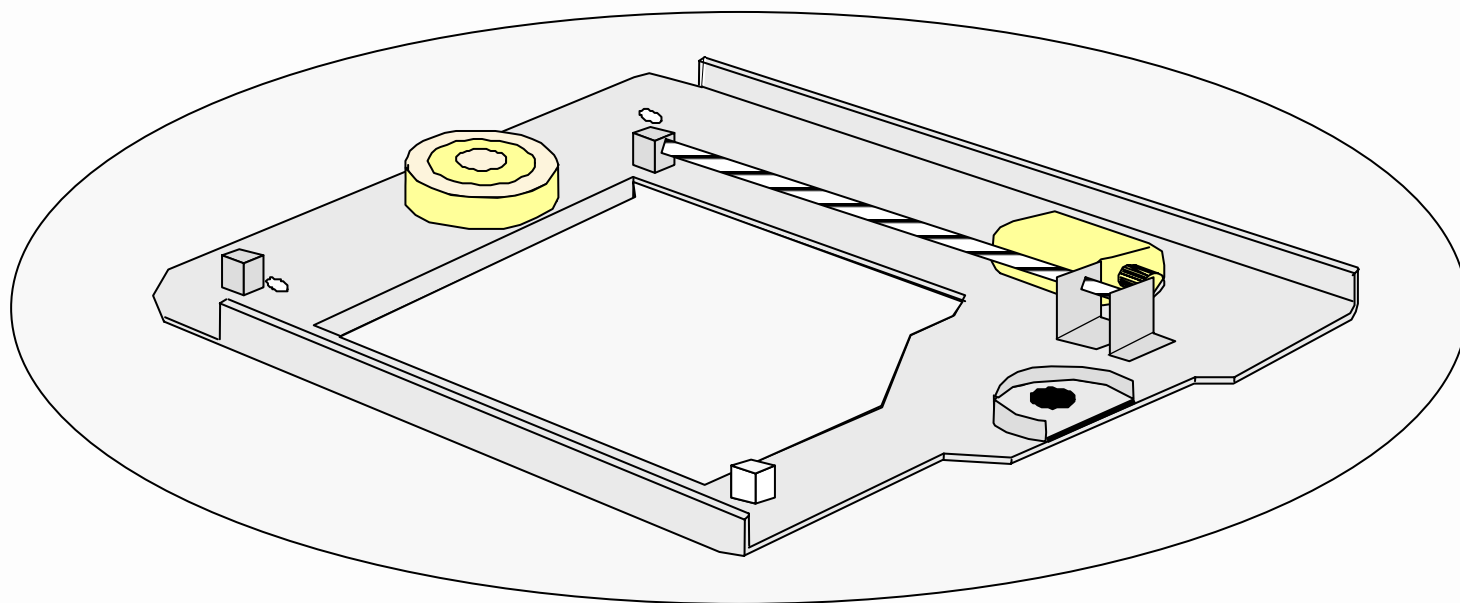
Cポイントを求める為にBポイントに試し錘Tを設定する。すると初期アンバランスがF+Tにθ分ずれる事になる。試し錘を付けたBポイントからθずらしたCポイントが修正位置となる。修正錘は $T \times F / T$ で求まる。



振動モード解析 DVDドライブ

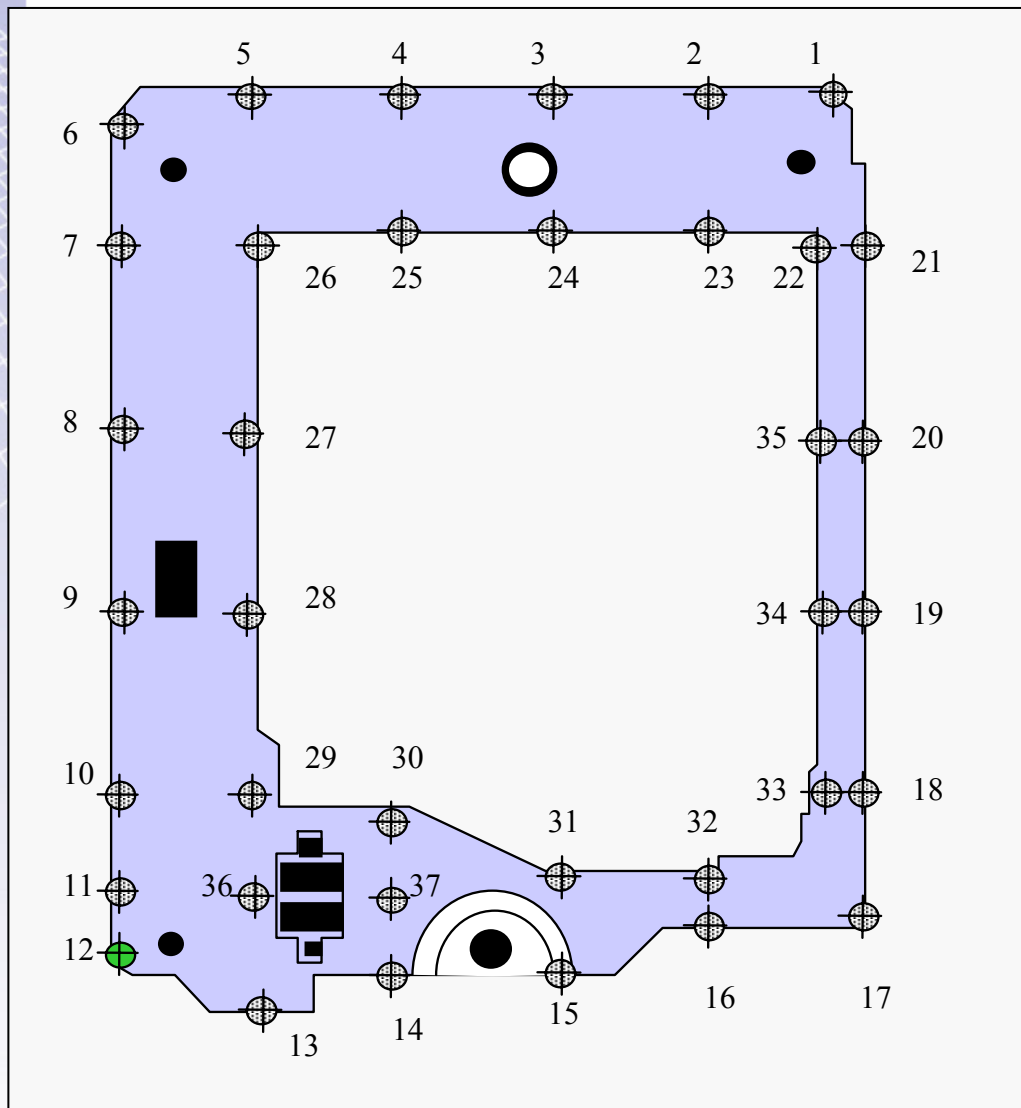
モータおよび付属品については、ガタが少なくまた摩擦の部分も無いため、振動の減衰が少ない。したがって、モータの駆動による回転振動と筐体の固有振動が近接した場合、異常振動、異音等が発生することになる。

このため、この筐体の固有振動を解析し、問題があれば構造変更等の対策をおこなう。



筐体：鉄板のプレス材にモータ、歯車、駆動用シャフトを付属したもの

計測点(下面)



計測:インパルスハンマによる加振点移動法

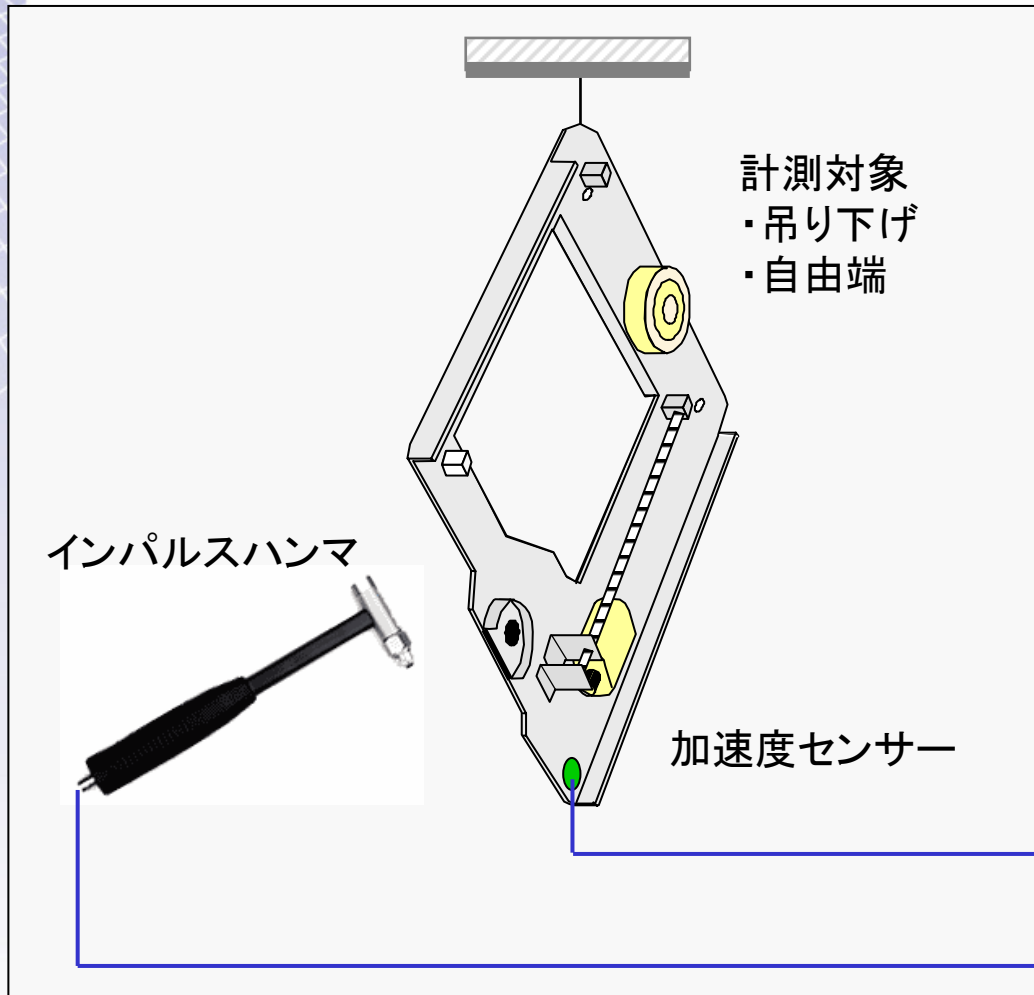
拘束条件:自由端(吊り)

⊗ 加振点
ポイント37に設置

⊙ センサー
ポイント12に設置(リファレンス)

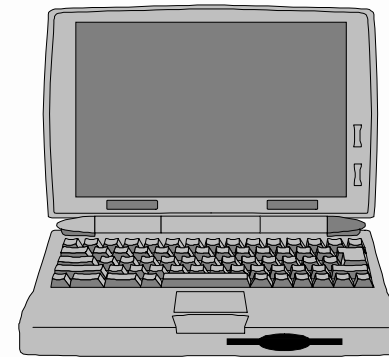
実験の概要(加振点移動法)

DVD用フレーム



コンピュータ

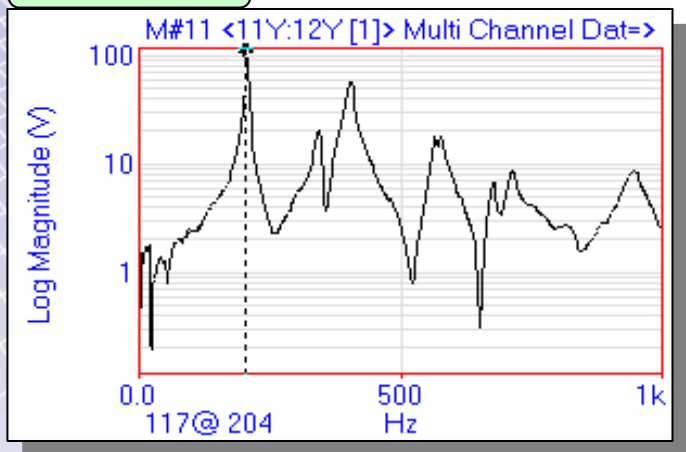
- ・計測ソフトウェア DS-0221
- ・モード解析ソフトウェア ME'scope



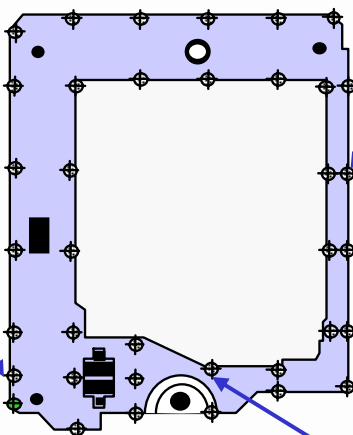
計測器 DS-2000

計測データ(伝達関数)例

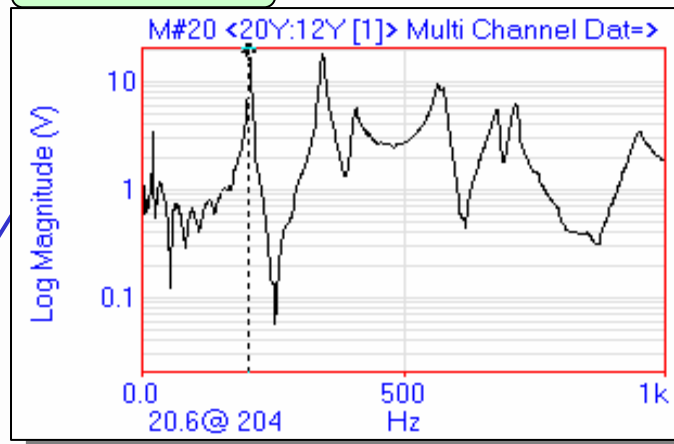
No.11のデータ



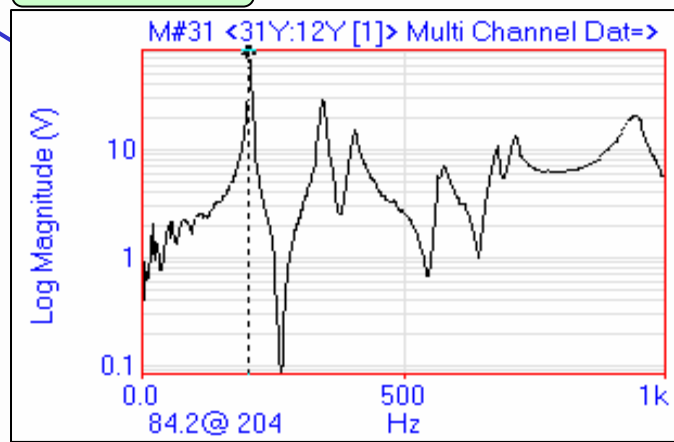
DVDディスク(下面)



No.20のデータ



No.31のデータ

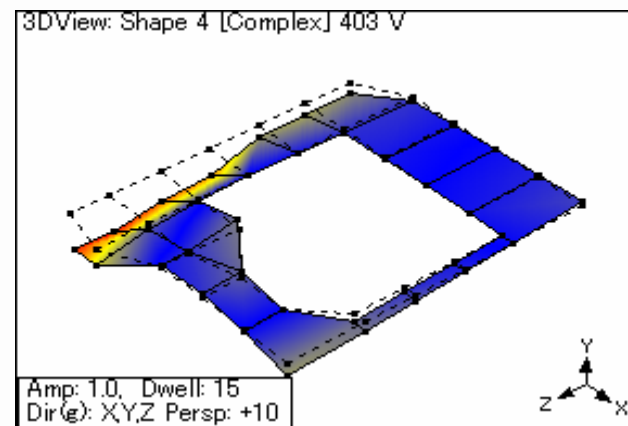
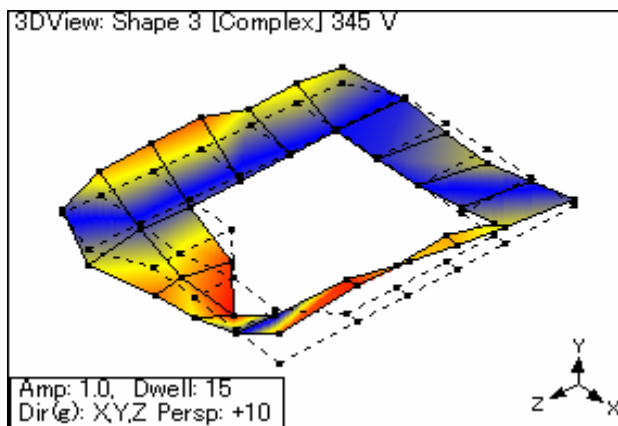
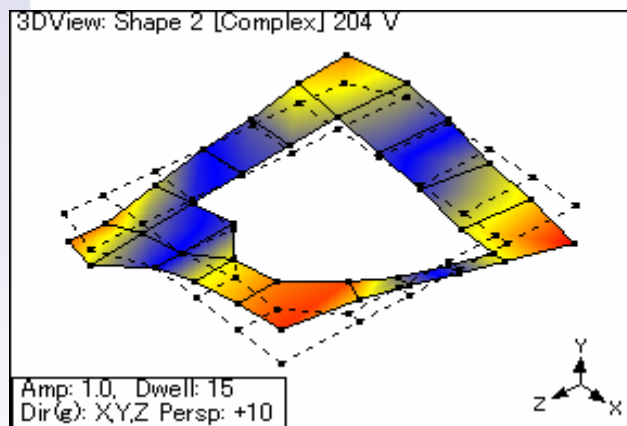
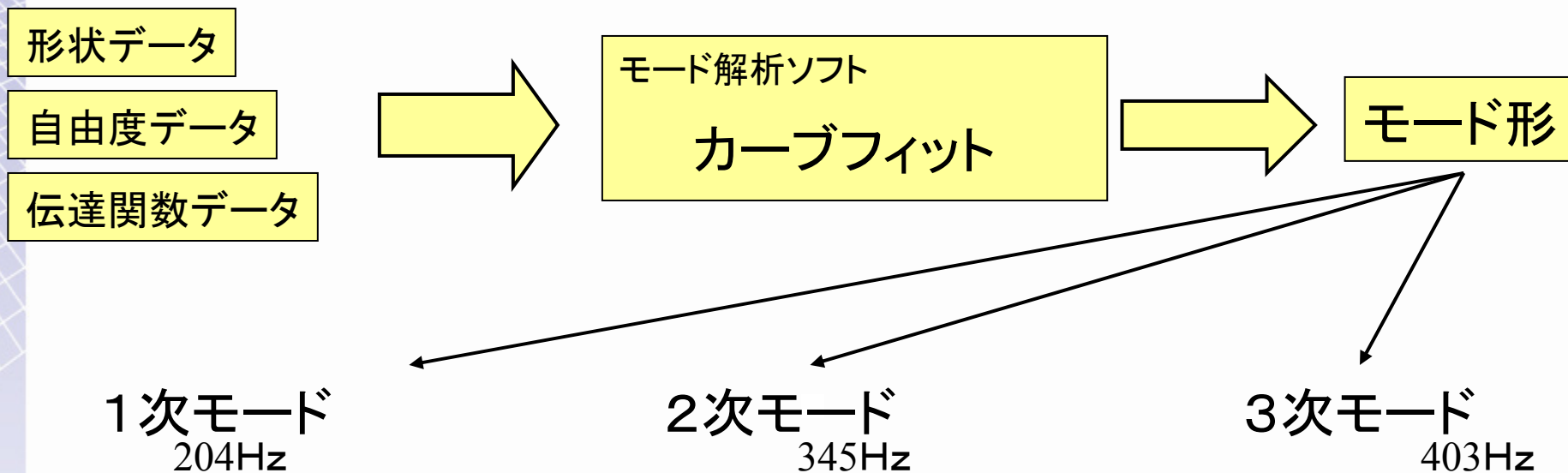


ShapeTable 1.Shp: 9 Residue mode shapes: Shapes

File Edit Display Tools

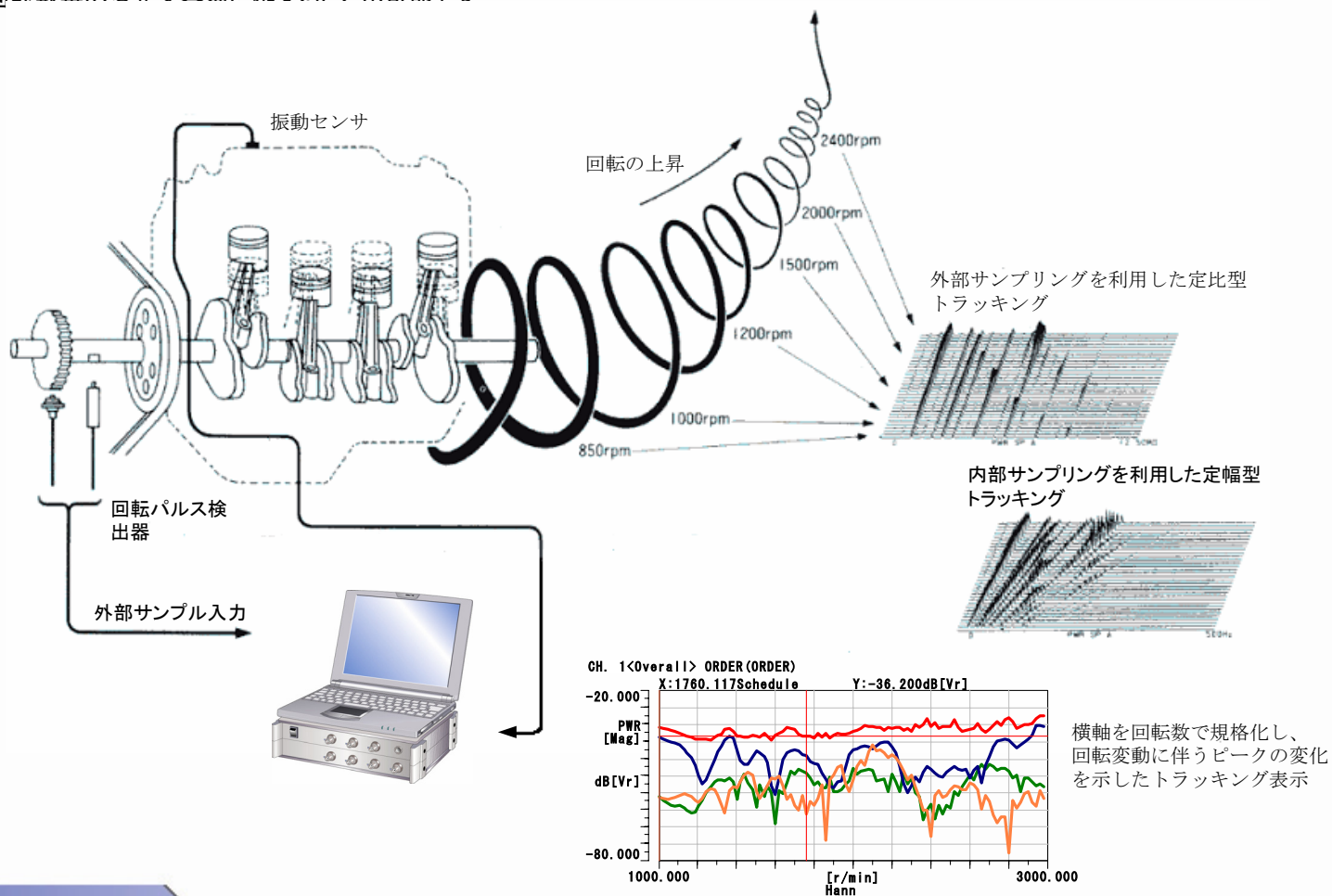
Shape	Frequency	Damping	Units	Damping (%)
1	19.5	1.51	V	7.73
2	204	1.71	V	0.837
3	345	4.23	V	1.23
4	403	7.32	V	1.82
5	566	5.99	V	1.06
6	574	6.35	V	1.11
7	676	7.36	V	1.09
8	708	9.33	V	1.32
9	944	17.5	V	1.85

振動モード形の例



トラッキング解析とは

回転機器から発生する音、振動等の動特性ではその起振力が回転に依存するため、基本回転成分の他に回転数の整数倍の強制振動成分や、その機器を構成している部品の共振による成分が現れます。また回転機器の回転数は必ずしも一定ではなく、航空機のエンジンのように低回転から高回転まで幅広い回転速度範囲をもつものでは、回転数によって現れる信号成分も広い周波数範囲を変化します。回転機器を構成している部品がどの回転速度で共振を起こしているのか、または回転速度の何倍の成分が共振しているのかを解析するのがトラッキング解析です。下図はトラッキング分析の概念図を示したもので、RPM・スペクトル線図は回転速度の変化に対する周波数(次数)スペクトルの変化を三次元表示したものです。さらにRPM・トラッキング分析は特定の回転速度において何次の成分が共振しているかを二次元表示したものです。また基本の回転周波数とその高調波成分の比例関係を正規化してしまえば、回転数が変化してもその比例関係は変わらず、回転速度に同期して発生する成分の回転数毎の変化を突目・坩えスコープが可能です。



自動車関連におけるトラッキング解析事例

以下自動車関係で実際に応用されているトラッキング解析事例を示します。

項目	内容	ユーザ	
ギアノイズ	ギアの噛合い音/振動 (定比/定幅)	ミッション、デフ・カウンタ のメーカー	高次を見る場合が多い
自動車部品	騒音と振動	吸排気部品、マウント、 足回り、タイヤ	
完成車室内騒音 こもり音	定比トラッキング	自動車メーカー 車体メーカー	エンジンこもり音 (2次、3次・・・)
完成車両のうなり音	定比/定幅トラッキング	自動車メーカー	ギアの音
風切音	オクターブトラッキング	車両メーカー	横軸車速 (SPEED)
エンジン音	定比トラッキング オクターブトラッキング	自動車、エンジンメーカー	
アイドル振動	定比トラッキング (1次、0.5次)	自動車、駆動系メーカー	燃焼によるトルク変動、 回転アンバランス
フラッタ振動	定比トラッキング (車速)	自動車メーカー	走行中の外力によるハ ンドルの強制振動
シェーク振動	定比トラッキング (車速)	自動車、駆動系メーカー	エンジン剛体共振、車 体の曲げ、ねじり共振、 ステアリング系共振