

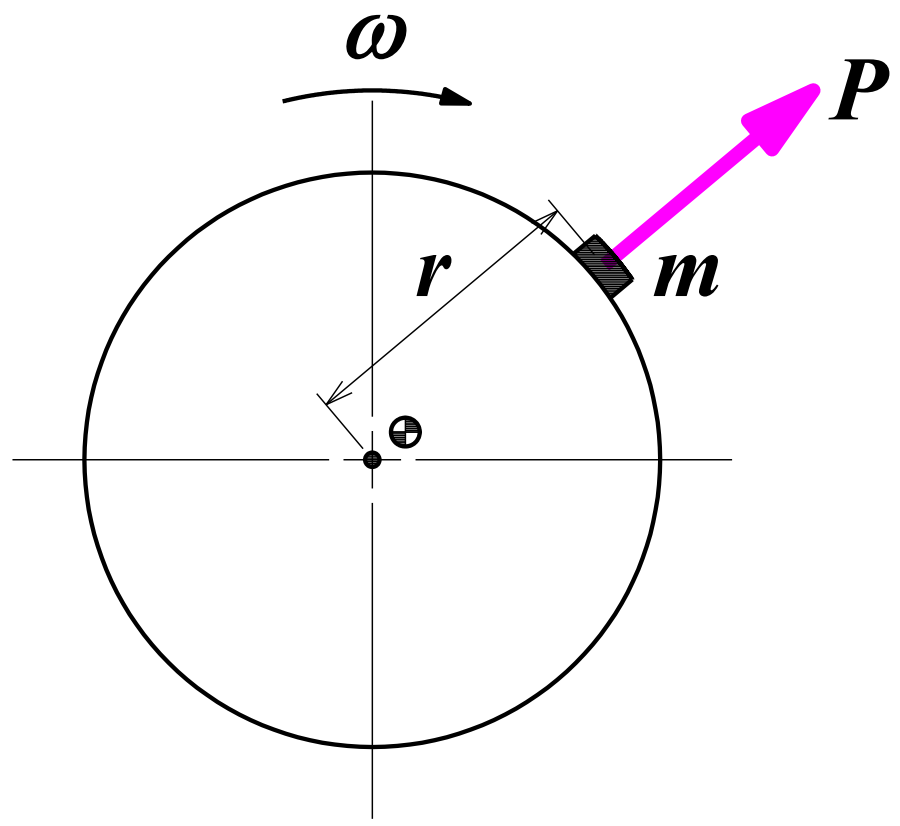
釣合い試験と釣合い試験機

Balancing and Balancing Machines

目次

■ 不釣合いが回転すると遠心力が発生	3	■ 高速回転体の釣合わせの実態	45
■ 回転機械に及ぼす不釣合いの影響	4	■ 振動センサ	46
■ 不釣合いの発生原因	5	■ 横形ソフト形釣合い試験機の長所と欠点	47
■ 釣合わせを行っているワーク	8	■ 横形セミハード形釣合い試験機の長所と欠点	48
■ 釣合わせの方法	10	■ ハードタイプ釣合い試験機の長所と欠点	49
■ 不釣合いの修正方法	11	■ 釣合い試験機の性能表示 (JIS B 7737)	50
■ 釣合わせ ⇒ 不釣合いを取り除くこと	12	■ 許容不釣合い U の決め方 (ISO1940 JIS B 0905)	51
■ 不釣合い	13	■ 各種回転機械に推奨される釣合い良さの等級 (JIS B 0905) その1	52
■ 1面修正、2面修正と多面修正	14	■ 各種回転機械に推奨される釣合い良さの等級 (JIS B 0905) その2	53
■ 2面釣合わせの修正面	15	■ 許容残留比不釣合い μm から許容不釣合い $\text{g} \cdot \text{mm}$ を求める	54
■ 2面釣合わせの考え方	16	■ 不釣合いを2つの修正面に分配する	55
■ 静・偶不釣合いへの変換	21	■ 剛性ロータと弾性ロータ	56
■ 釣合い試験機とフィールドバランス	22	■ 弾性ロータの危険速度と釣合わせ	57
■ 立形釣合い試験機	23	■ 従来の不釣合い修正法の課題	58
■ 偏心補正はなぜ必要か	25	■ 従来の2面修正法の限界	59
■ 偏心補正の手順	26	■ 多速度・多面修正法	60
■ 修正誤差 (角度誤差)	27	■ 多速度・多面修正法の導入効果	61
■ 修正誤差 (量誤差)	28	■ 高速主軸のバランスの課題	62
■ 修正誤差 (修正面誤差)	29	■ 横形多速度・4面釣合い試験機	63
■ 不釣合い修正に制約があるとき	30	■ 軸受Assy主軸の多速度・多面釣合い試験機	64
■ 横形釣合い試験機	31	■ フィールドバランス	65
■ 釣合い試験機の性能検査	32	■ フィールドバランスの方法	66
■ 到達最小不釣合い検査	33	■ バランス修正前に対象機械の事前調査	67
■ 不釣合い低減比検査 (ISO2953)	34	■ 圧電型加速度センサ設置上の注意点	68
■ 横形釣合い試験機	35	■ 試しおもり質量の選定基準	69
■ 横形釣合い試験機の振動架台	36	■ 修正面数の決定	70
■ ソフトタイプの振動架台	37	■ 付加測定時に、機械ストレスを増大させない方法	71
■ ハードタイプの振動架台	38	■ 不釣合い修正の計算例	72
■ 横形釣合い試験機 (ソフトタイプの感度曲線)	39	■ 振動架台バネの固有振動数の計算	76
■ 横形釣合い試験機 (ハードタイプ感度曲線)	40	■ 回転体の釣合わせ：番外編	77
■ 横形釣合い試験機の構造 (振動架台)	41		
■ 横形釣合い試験機の構造 (舟形振動架台)	42		
■ 横形釣合い試験機の構造 (軸受ローラ)	43		
■ 横形釣合い試験機の構造 (ローラ直径とローラ軸径の相関)	44		

- 1. 遠心力が振動・騒音の直接的な原因である
- 2. 遠心力は 不釣合いmの大きさに比例し
 回転数 ω の2乗に比例する



$$F = m \cdot r \cdot \omega^2$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

$$F : N \text{ (ニュートン)}$$

$$n : rpm$$

大きな振動、騒音、不快感

性能低下

故障の原因、寿命短縮、事故



不釣合いを取り除くことが不可欠

釣合わせ = 回転機械製造の重要な工程

全数検査が原則



釣合い試験機やフィールドバランスによる釣合わせ

最も効果的で、経済的な手段

設計上の不備による

許容不釣合いを考慮した設計を実施すれば、**初期不釣合いは低減**できる。

設計開始前の検討・考察は、**極めて重要**である。

修正面・**修正方法**などは設計時に決めておくべきである。

1. 回転中心軸に対して、**質量配分が不均一**
2. 不適切な**ハメアイ**による**偏心** (ベアリング等)
3. 回転体の表面 (内面、外面)の**加工が不完全**
4. 不釣合いの**発生面と修正面が異なる構造** (ビルトインモータの修正面など)

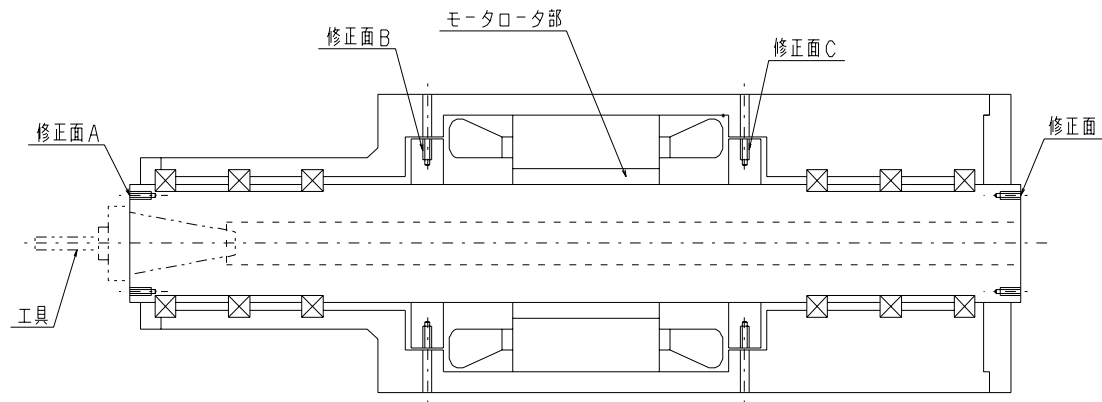
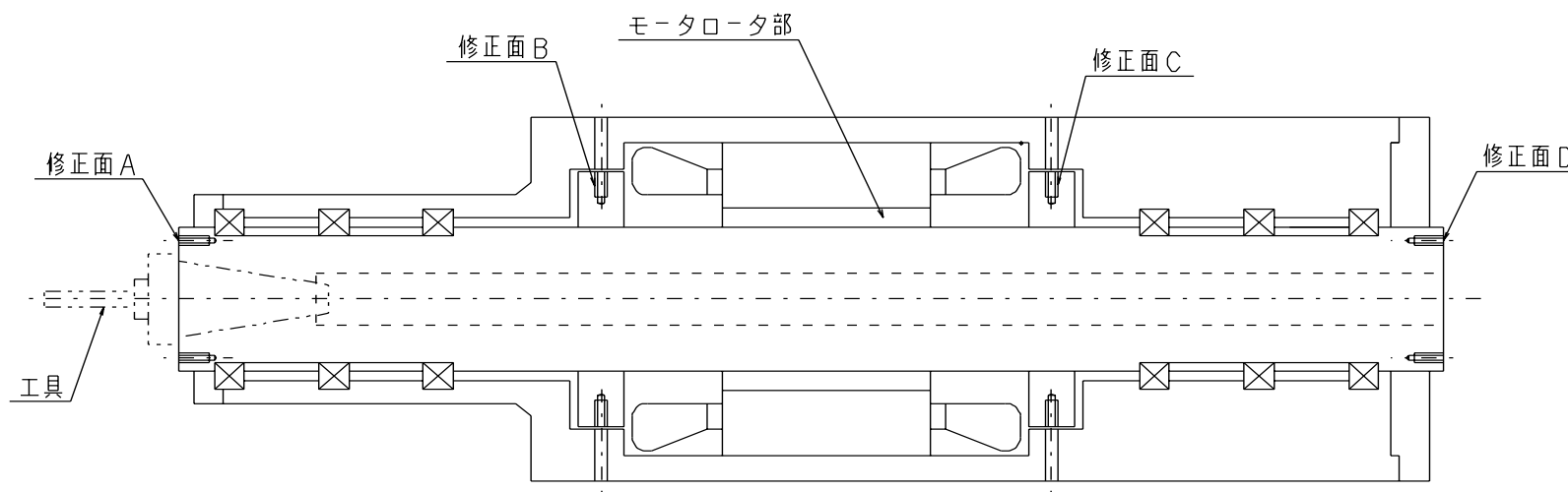


図2 スピンドルの構造例

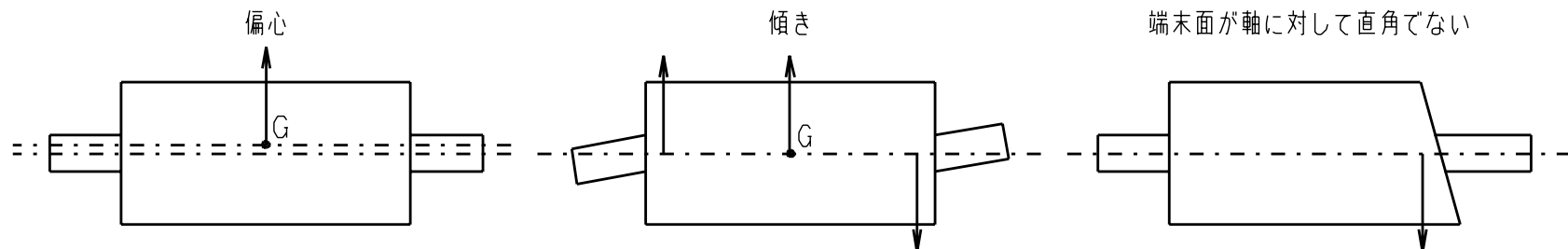
材料に欠陥があるとき

1. 鋳物、鍛造、成形、押出し品などの**内部に巣**がある。
2. 材料**密度が不均一**である。
3. 溶接部品などの**溶接の不均一**、材料厚みの**不均一**
4. 転がり軸受の**すきま調整不良**、回転軸に**偏心**



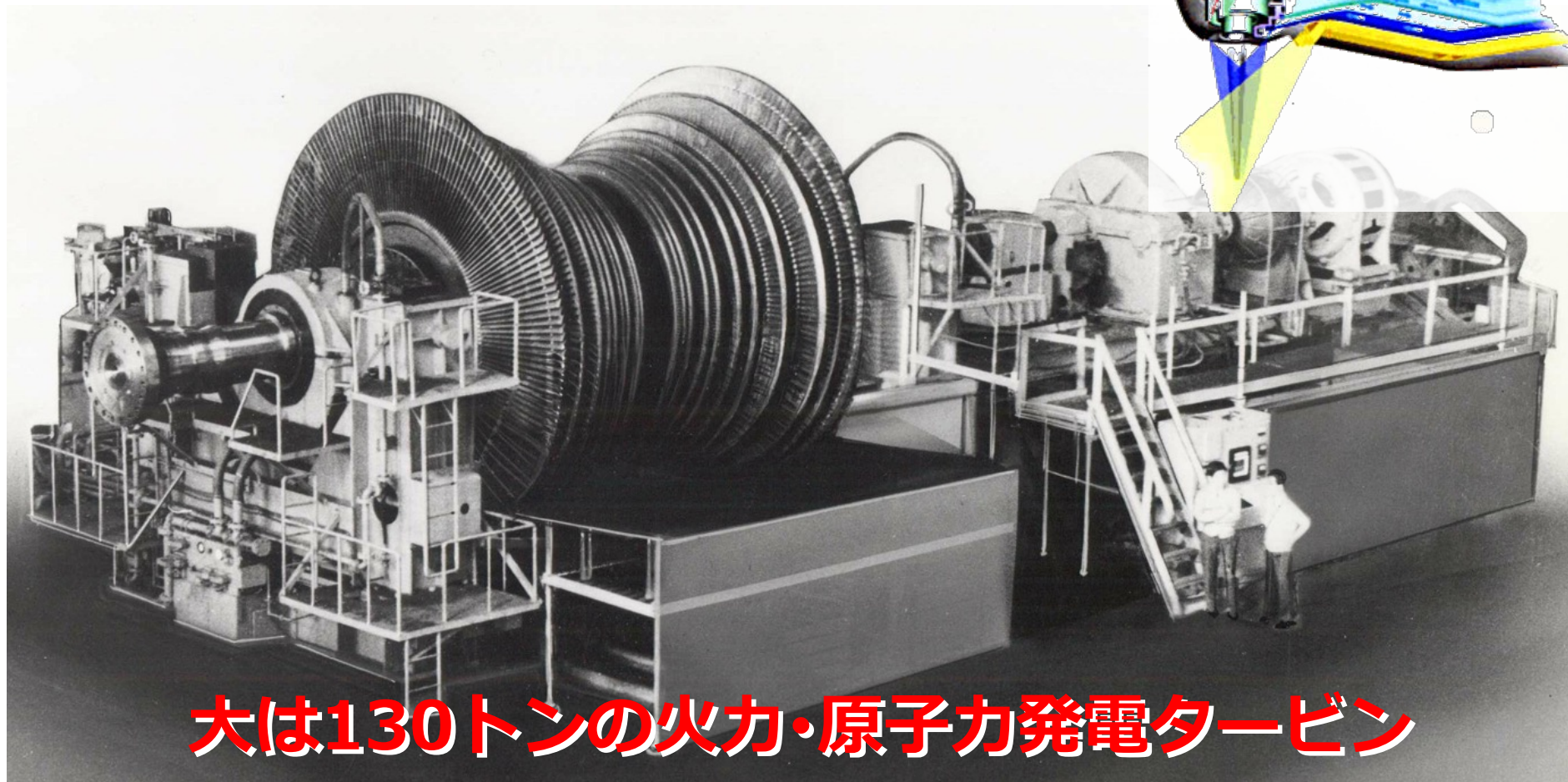
製造、組立て時の不備によるもの

1. 溶接、鋳造時の**成形不良**、あるいは**不均一な塗装**
2. 機械加工時のチャックあるいはクランプ不良による**ジャーナル部の偏心**
3. 製造工程に起因する**永久変形**
(残留歪、加工歪、ハンダ付け、溶接、締めりバメ等による変形)
4. ボルトの**不均一な締めによる変形**
5. **組立ての不良**、例えば長さの異なるボルト、異種のワッシャ、ナットなど



小は1グラムの歯科タービン

回転数：40万rpm



大は130トンの火力・原子力発電タービン

回転数：火力3000/3600rpm、原子力：1500/1800rpm

自動車、車両、航空機、エンジン

クランクシャフト

フライホイール

エアコン圧縮機

クラッチ部品

ビスカスカップリング

ディファレンシャル

ホイール

ジャイロスコープ

ターボチャージャ

オルタネータ（発電機）

プーリ（ダンパプーリ）

トルクコンバータ・自動変速機

プロペラシャフト

ブレーキドラム，ディスク

タイヤアッセンブリ

メータの指針

電気機械

各種モータ、発電機、音響・映像機器、ディスク、家電製品

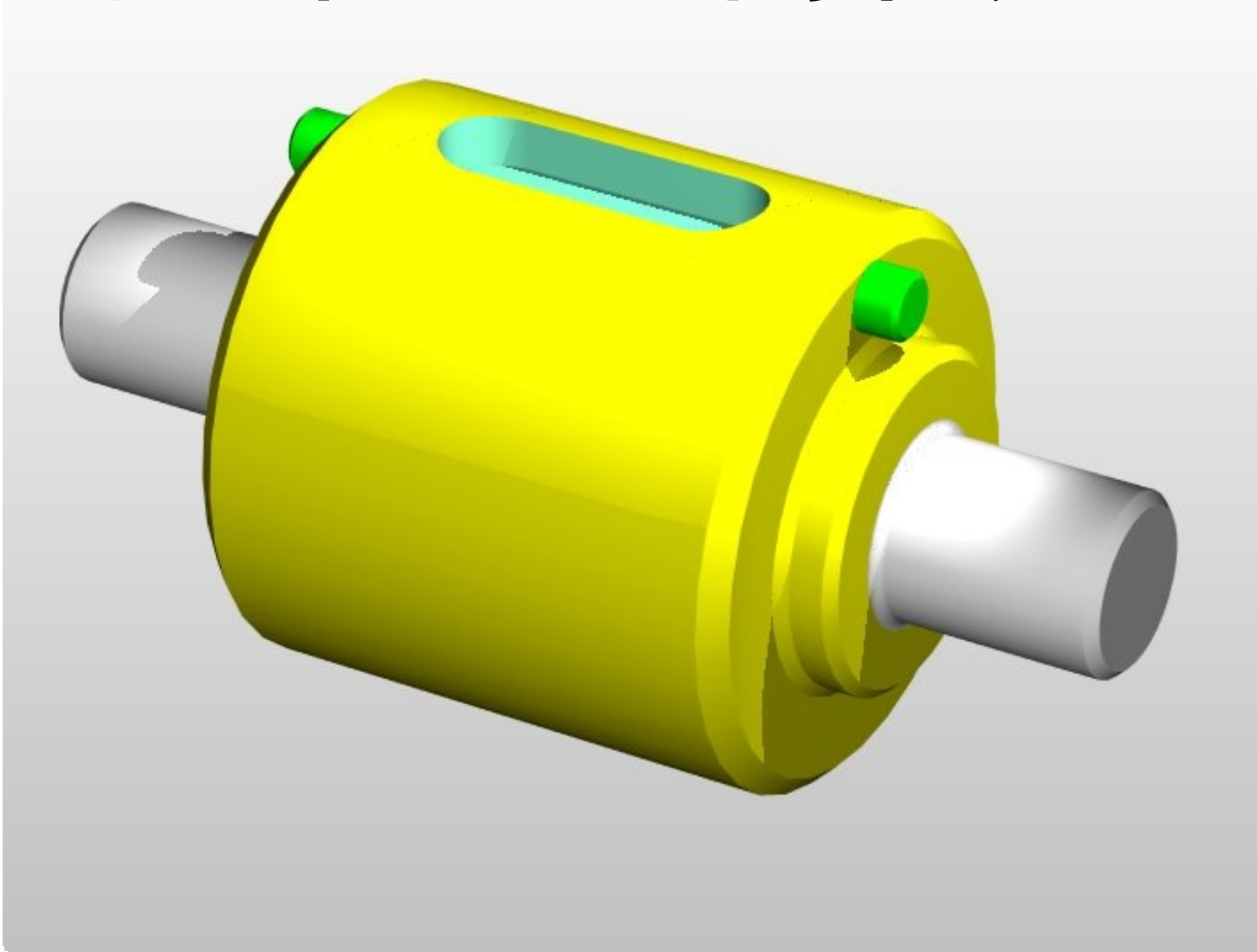
各種の機械

工作機械（主軸・刃具・砥石），ポンプ，ファン・ブローア，冷凍機

コンプレッサ，タービン，製紙ロール，繊維・製糸機械，

印刷機，遠心分離機，圧碎機，歯科用機器，人工衛星・ロケット

軽い部分に錘を取り付ける



重い部分を取り除くか，反対側に錘を付ける

付加修正

おもりを溶接
接着剤

リベット

ねじ

かしめ・打ち込み

おもりの移動

プロペラシャフト、トルクコンバータ、送風機
ポリゴンミラー、小型モータ

フライホイール、ブレーキドラム

大型タービン、繊維機械、ロール、工作機械

タイヤアッセンブリ、モータ電機子

研削砥石

削除修正

ドリル

旋削(偏心)

研削・グラインダ

ミリング・フライス加工

クランクシャフト、フライホイールなど
ブレーキディスク、ポンプインペラ

小形精密部品

トルクコンバータ用ステータ

その他

センタ穴位置の調整

選択組立

クランクシャフト素材

タービンブレード

釣合いを数値で表す必要がある

不釣合いを**ゼロ**にする … **許容値**以内にする

釣合いの状態とは

回転体の**質量中心**と**回転中心**が**一致** = 理想状態

不釣合い = U

余分な質量 m が付加された状態

$U =$ 余分な質量の大きさ (m) \times 質量の半径(r)

回転体の質量中心と回転中心が e だけずれている

偏重心(e) = 比不釣合い(μm)

1. 不釣り合いによる表示 $U = m \times r$ 工程上管理し易い表現

単位は、 $g \cdot mm$, $g \cdot cm$ など

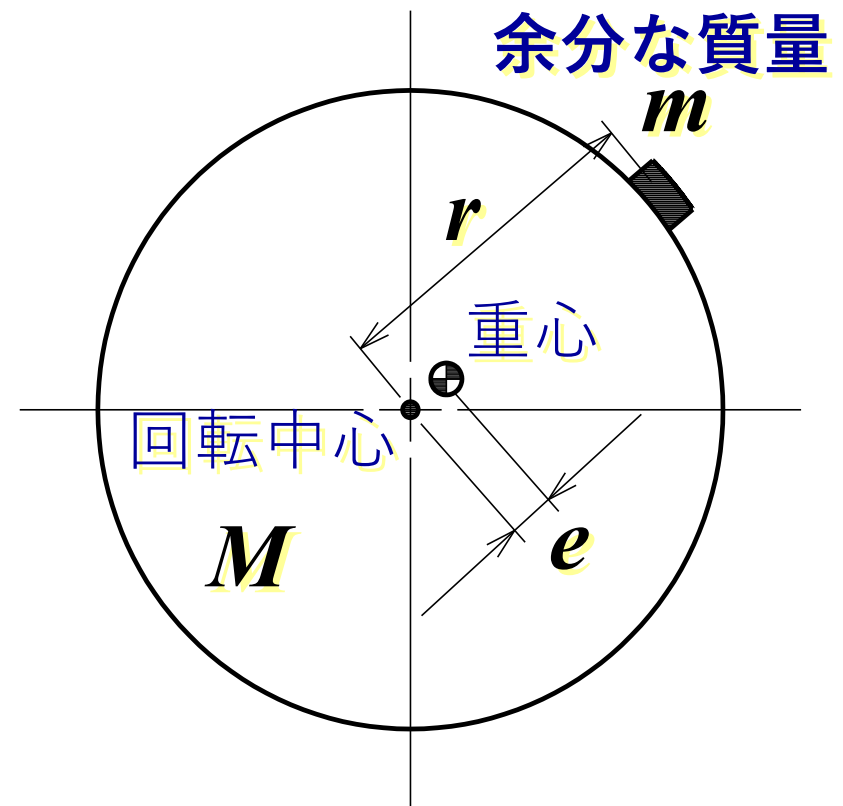
2. 偏重心 (比不釣り合い) e による表示

ワークの大小によらず，釣り合い精度が評価できる表現

単位は、 mm , μm など

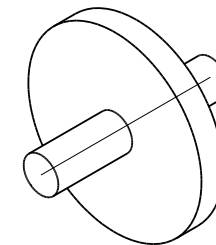
3. 回転体の質量 M とすると その比不釣り合い e は

$$e = \frac{m \cdot r}{M + m} = \frac{U}{M + m} \approx \frac{U}{M}$$



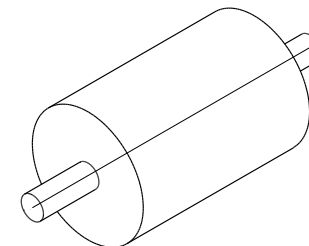
1面修正 (静釣合わせ)

薄い円盤状ロータの場合 : 静不釣合い



2面修正 (動釣合わせ)

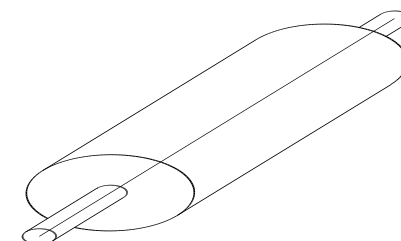
細長いロータの場合 : 動不釣合い



3面以上の釣合わせ (多面釣合わせ)

細長く、高速回転域で変形するロータ

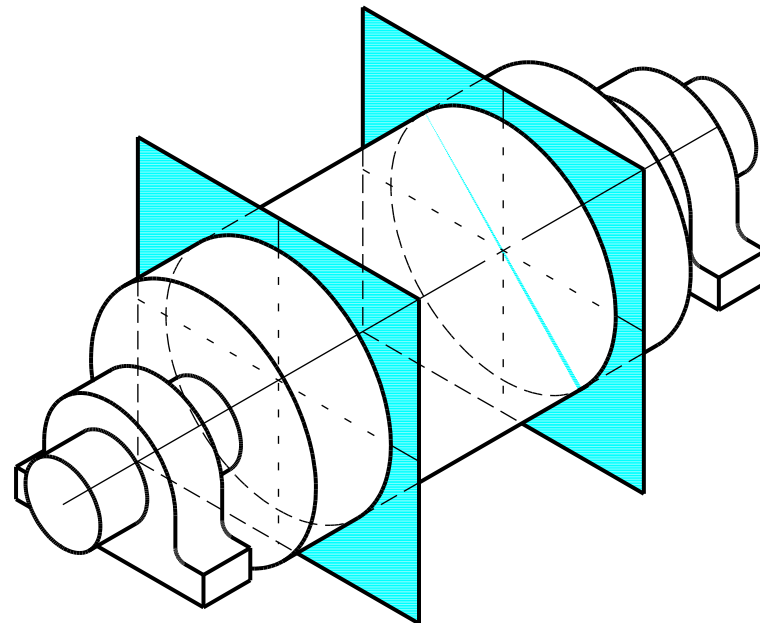
: 弾性ロータと呼ぶ



修正面とは、重りを付けたり、除去する面（軸に直角な面）である。

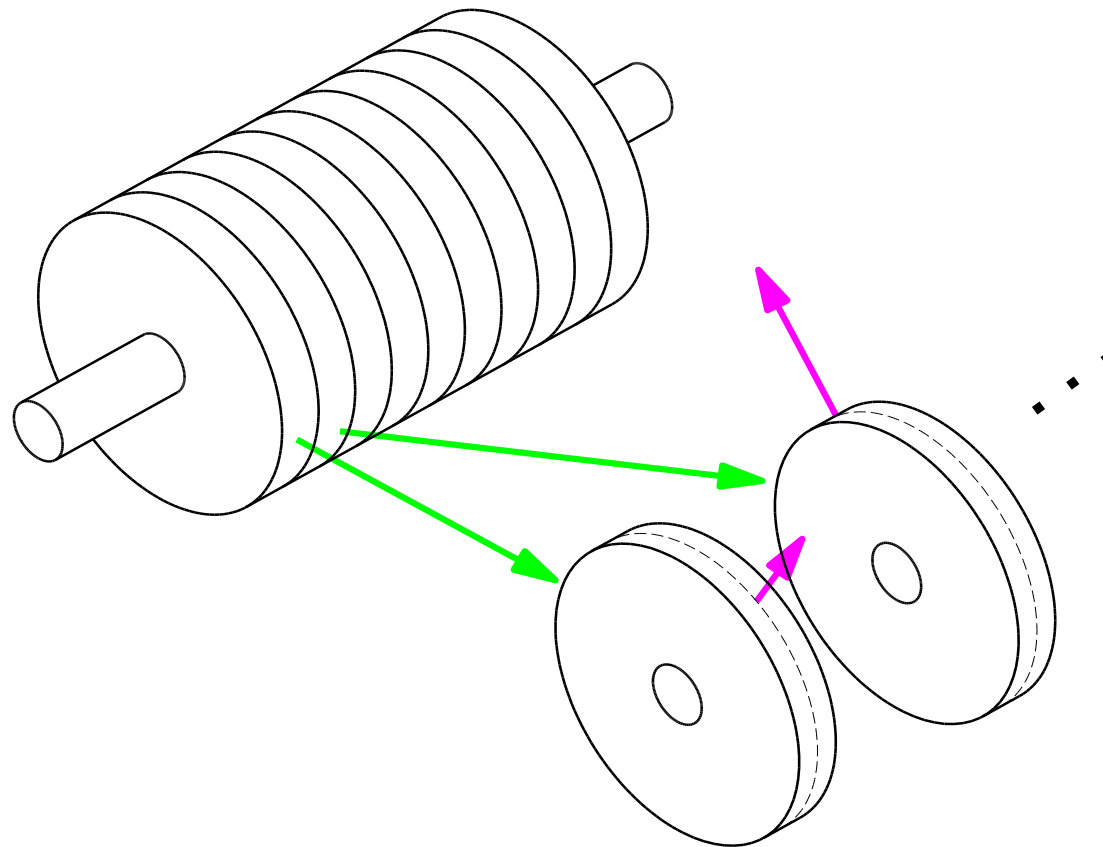
低速機械の**修正面**は、ロータ両端の2面を選択すればよい。

高速機械では、**不釣合いの残留面**と**修正面**を可能な限り**一致**させないと、その2面間で**ネジリ振動**を誘発する。**修正面の選択は極めて重要**で、ロータによっては**多面修正**を選択する必要もある。

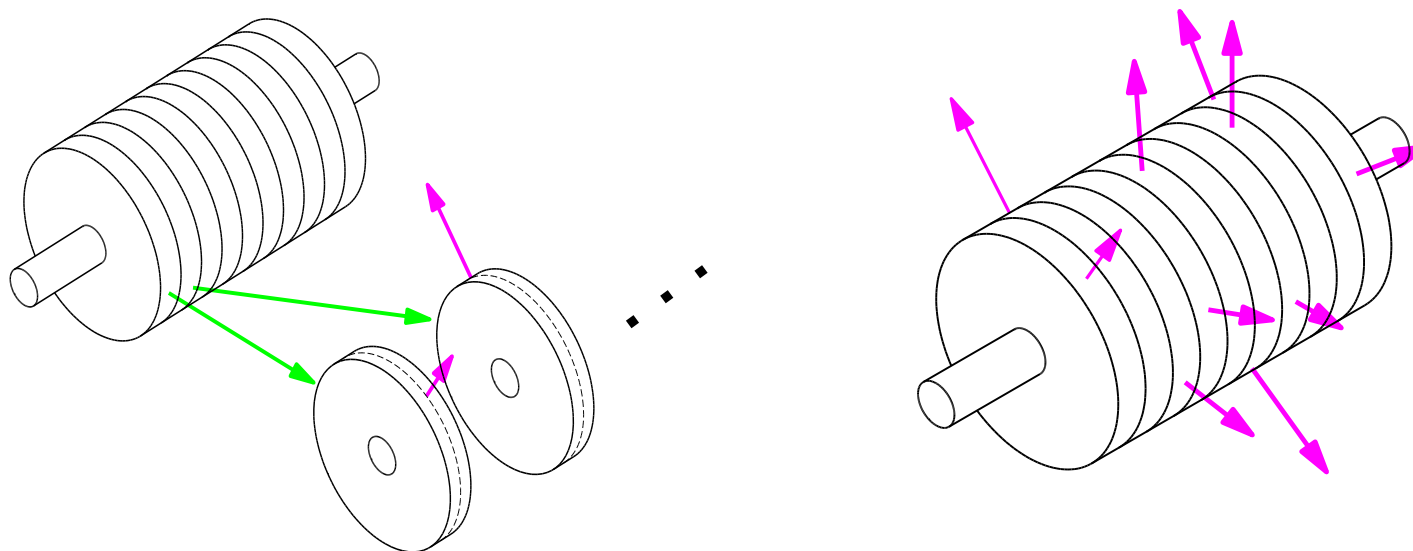


全てのロータは、**薄い円板状のロータが軸方向に積層した状態**

薄い円板は、それぞれ**独立した不釣り合いベクトル**を持っている



全ての円盤を釣合わせれば良いが...



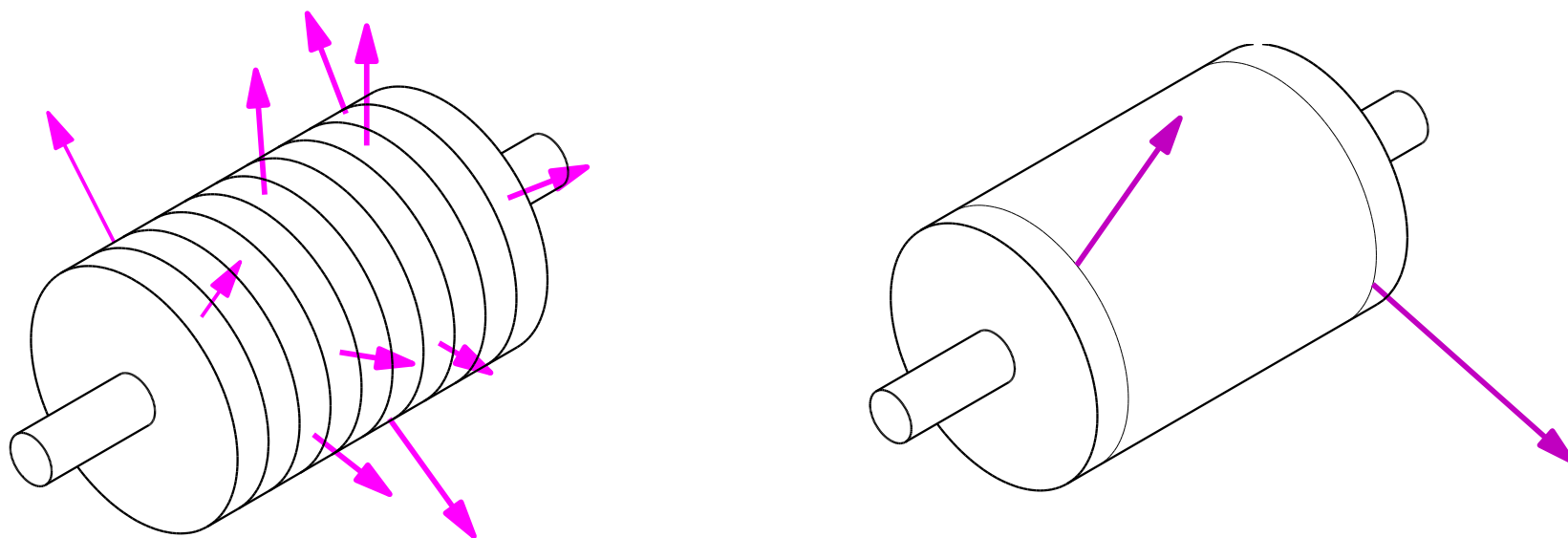
現実的でない

全ての不釣合いを合成し

最小限の数の不釣合い面に代表させる

代表された不釣合い面を釣合わせる

最小限の数の不釣合い = **2個**の不釣合い

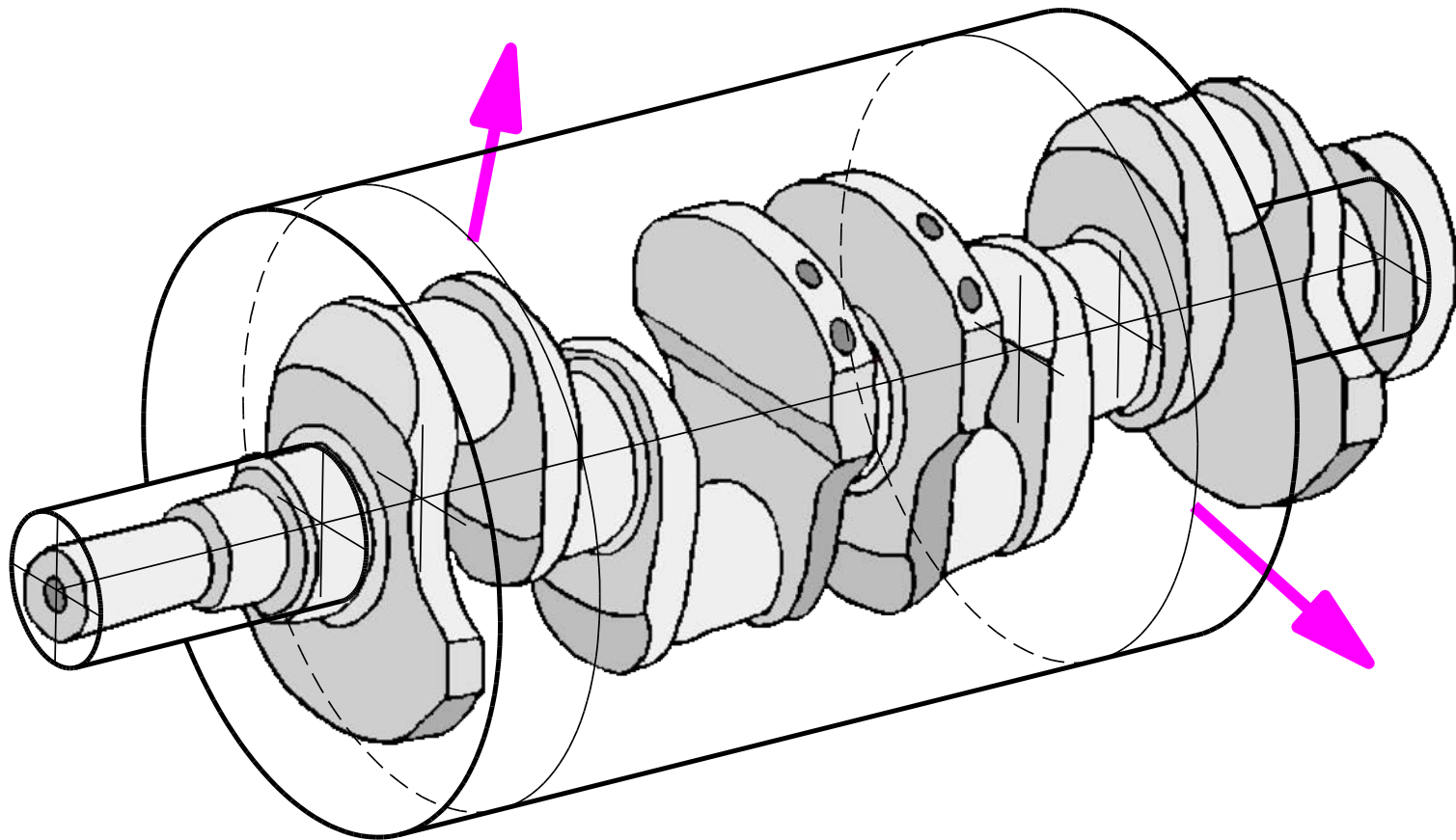


剛性ロータは、2個の不釣合いに代表させる事ができる

2個の修正面で釣合わせる = **2面釣合わせ**

剛性ロータを完全に釣り合わせるための必要十分な条件

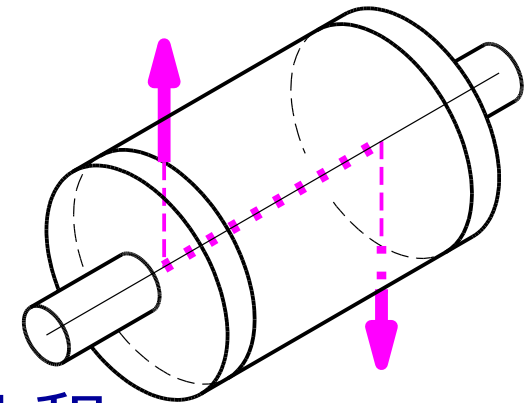
どんなに複雑な不釣合い分布であっても
剛体ロータであれば、2面釣合わせでOK



軸方向に分布した不釣合い群を、2個の修正面に代表させ

代表の不釣合いを修正

全体として釣合う



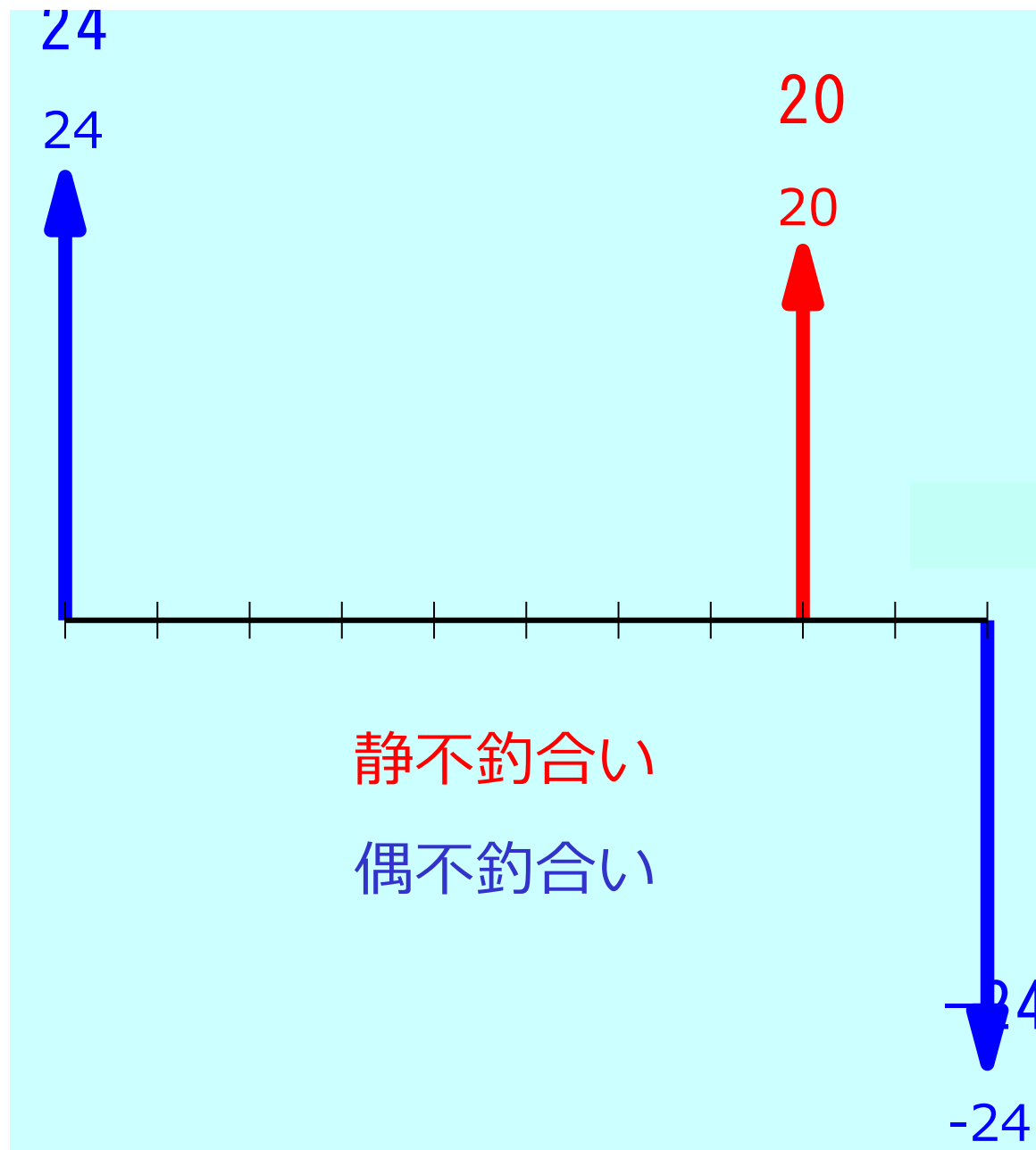
不釣合いの種類

静不釣合い: 分布した不釣合いのベクトル和
回転させなくても重力で検出できる

偶不釣合い: 同じ量で反対向きの、2方向の不釣合い
回転させると、遠心力が偶力になる

動不釣合い: 静不釣合い+偶不釣合い

薄い円板状ロータは、一般的に偶不釣合いが小さいので
静不釣合いだけを修正すれば良い。



釣合い試験機



工場に据付して使用

概要

回転部品**単体**を釣合い試験機に**セット**し回転させ、**不釣合い**を測定する試験機である

対象のワーク

- ・ ファン、ブロワの送風機部品
- ・ スピンドルの工作機械部品
- ・ ブレーキディスクの自動車部品などの回転機械部品

測定対象の
大きさ(重量)に**制限がある**

フィールドバランサ



現場にて釣合わせ

概要

自己回転が可能な**回転機械**に、センサをセットして**不釣合い**を測定する測定器である

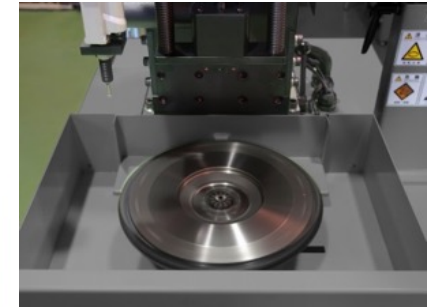
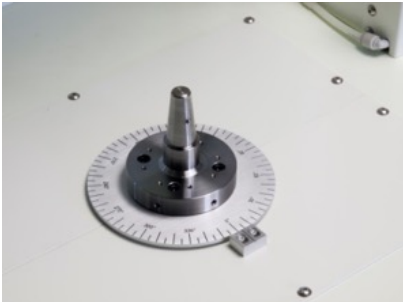
対象のワーク

- ・ 工作機械 ・ 研削盤の主軸
- ・ 繊維巻取り機械
- ・ 遠心分離機、送風機
- ・ 発電タービン など

測定対象の
大きさ(重量)に**制限がない**

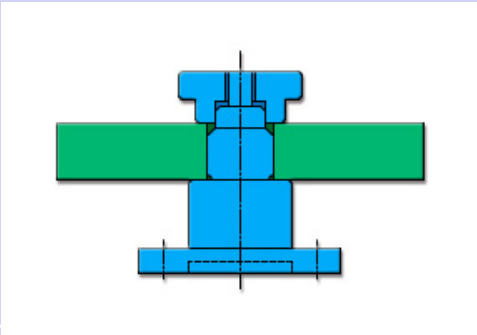
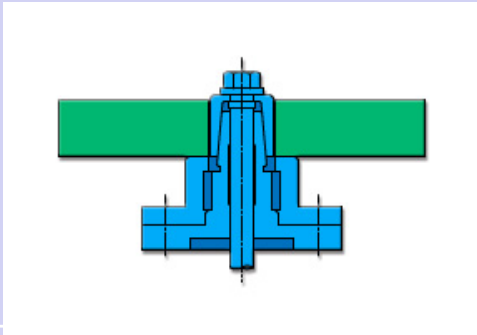
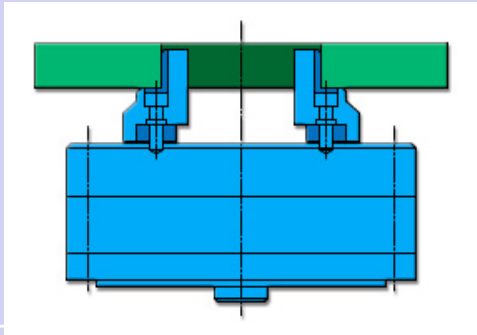
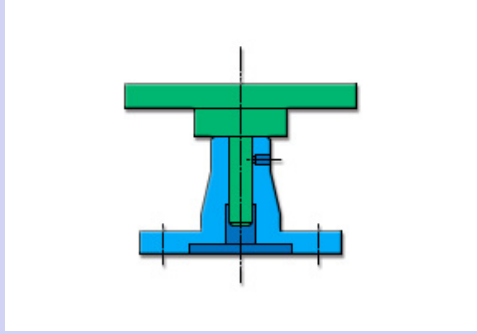
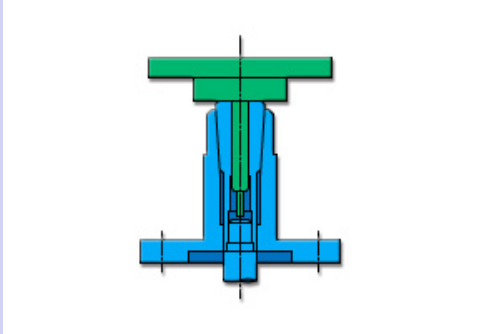
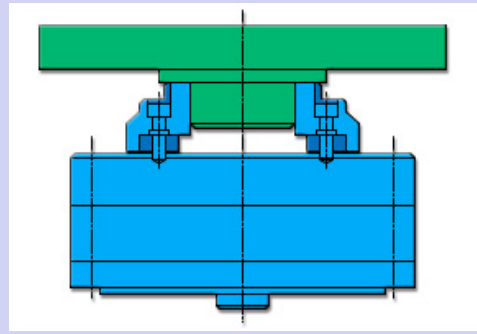
両者の測定原理は同じである。

立形：軸のないワーク, 円板状のワーク



心出し基準, 高精度アダプタが必要

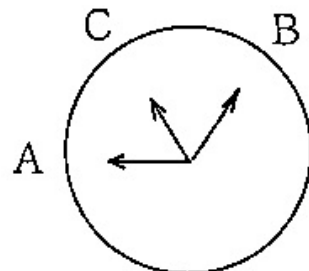
立形：軸のないワーク, 円板状のワーク

	手締め式	コレットチャック式	エアチャック式 (ダイヤラム)
内径 把握			
外径 把握			

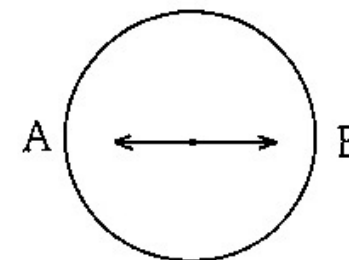
心出し基準：高精度アダプタが必要

1. 精密に作られた主軸でも、その**偏心量は零ではなく**、ある値を持っているのが一般的である。
2. 偏心量を持つ釣合試験機を使用し、ワークの釣合い修正を行うと、**偏心量に比例した修正誤差**が発生する。
3. 場合によっては、**主軸の持つ偏心不釣合いA とワークの不釣合いE が合成**される結果となる。
4. その様子を下図で説明する。

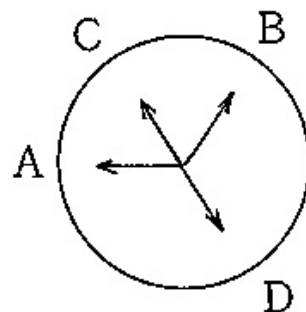
主軸、ワークにそれぞれA、Bの不釣合いを持っていると仮定すると、その**合成不釣合いはC**となる。ここで、Aを主軸の**偏心不釣合い**と云う。



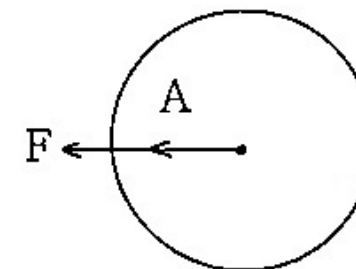
この結果、ワークは、主軸の持つ、**偏心不釣合いA**と**大きさが等しく、方向が反対の不釣合いE**とバランスする事になる。



主軸の不釣合いAを無視して修正すると、合成不釣合いCと**大きさが等しい、反対方向に修正重りD**を付加する事になる。



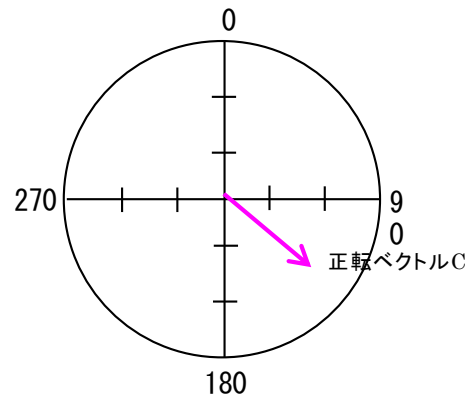
ここで、ワークを反転すると、主軸の**偏心不釣合いA**とワークの不釣合いEは、**同一方向に合成され、新たな不釣合いF**が発生させる事になる。



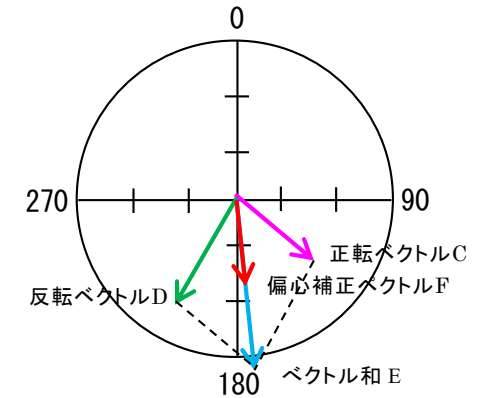
主軸を持つ釣合い試験機に於いて、偏心補正は不可欠な機能である。

偏心補正は、**主軸+アダプタの持つ不釣合い量を除去し、ワーク単体の不釣合い修正をする機能**で極めて重要である。偏心補正には2、3、4点法があるが、ここでは2点法について説明する。

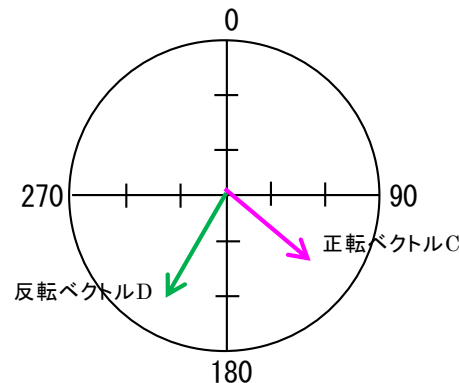
ワークを主軸に取り付けて振動ベクトルCを測定する。ここで、得られた振動ベクトルCは主軸とワークの合成ベクトルである。これを**正転ベクトルC**と呼ぶ。



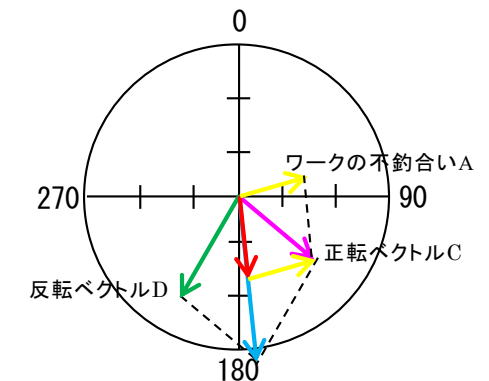
ここで、正転ベクトルCと反転ベクトルDのベクトル和Eを求める。これが**偏心補正ベクトルF**である。



ワークと主軸の取付位相を180度反転させ測定する。測定で得られたベクトルを**反転ベクトルD**とする。



正転ベクトルCと偏心補正ベクトルFとのベクトルの差が目的のワーク単体の不釣合いAとなる。



偏心補正を正確に実施するには、**アダプタ+主軸の不釣合い量と、ロータの不釣合い量を極力小さく抑えて、偏心補正データを取得した方が良い。**

測定された不釣合い量が正確であっても、修正時に誤差を生じて、1回の修正で合格に至らず2回、3回と修正を繰り返す事がある。

1. 角度誤差

- 1) 不釣合い修正に際して、付加あるいは削除修正する修正量の重心が、測定された角度位置に正しく一致していない場合に発生する誤差である。
- 2) 図1で初期不釣合いを U_0 、角度誤差 θ をもった修正量を U_1 とする。但し $U_0 = U_1$ である。このときの残留不釣合いを U_R とすれば、誤差率 ε は $\varepsilon = U_R/U_0 = 2\sin \theta / 2$ となる。この関係を図3に示してある。
- 3) 残留不釣合いを初期不釣合いの5%以内に収めるためには3°以内の正確さで修正しなければならない。
- 4) 図1から、修正した結果の残留不釣合いが、初期の不釣合いから、ほぼ90°ずれるのは正しい修正量を小さな角度誤差をもって修正した時に起こりやすい。
- 5) 図2に示す様に、大きな不釣合いを修正する際に、修正穴を複数個に分けて加工する時などは、修正穴の深さを厳重に管理し、正確な分力計算を行う必要がある。



図 1

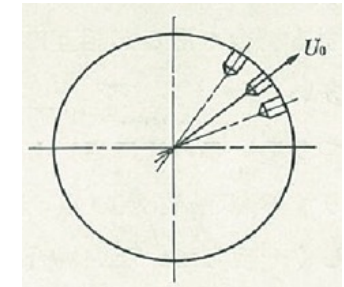


図 2

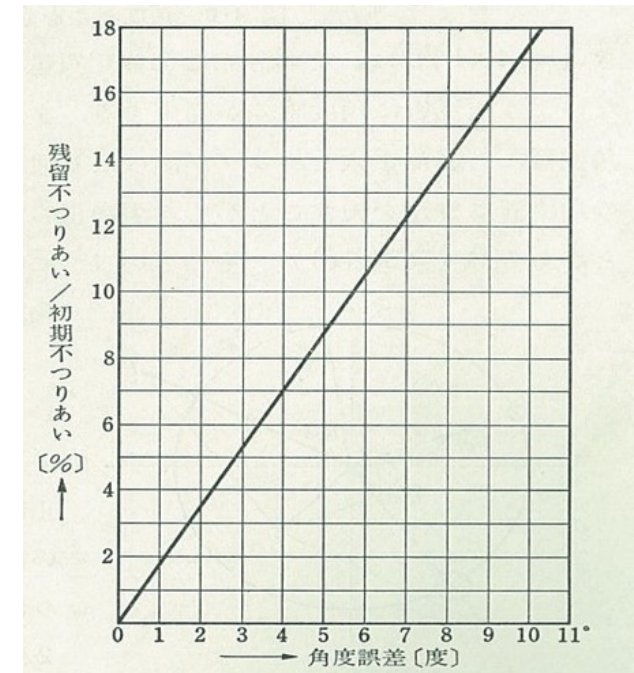
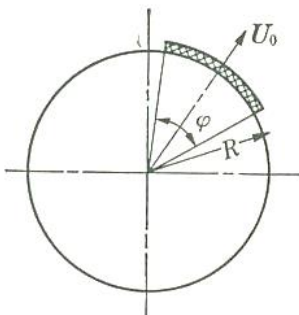


図 3

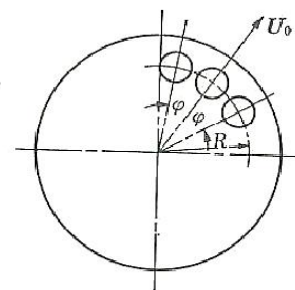
測定された不釣り合い量に対して、正しい修正量を施さない時に生ずる誤差を、量誤差と云う。

1. 量誤差

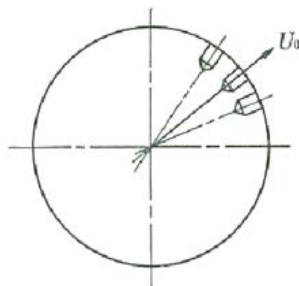
- 1) 前述の角度誤差があるときは、修正後の残留不釣り合い量にも影響するが、**量誤差は残留不釣り合いの角度には影響を与えない。**
- 2) 修正質量が、**広い角度にわたって修正**する場合に発生する誤差である。



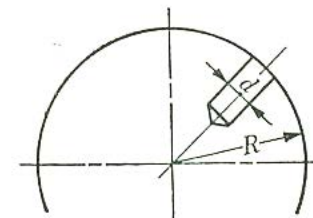
修正穴の数を増すと角度の広がりのため量誤差をとまなう。分力計算を厳重に行う必要がある。



- 3) ロータの外周から中心に向かって、深いキリ穴をあける場合に発生する誤差である。つまり修正量は、**修正質量と、その重心の回転中心からの距離 (修正半径)**との積である。



重心半径を考慮して修正質量を算出する必要がある。修正穴の数により、分力計算を厳重におこなう。



一般的に、ロータの動不釣合いは任意に選んだ二つの修正面に於いて釣合わせが可能である。

R、L面の修正面で正しい修正量を求めても、実際の修正位置がずれていれば修正誤差が生じ、残留不釣合いが残る。これを修正面誤差という。

1. 修正面誤差

1) 図4に於いて、不釣合いの測定値がR面で U_2 、L面で U_1 であったとする。この時R面には正しい修正面に U_2 の修正を施し、L面は Δl だけずれた位置に U_1 の修正を施したとすれば、これは等価的にL面に $U_L = (1 - \Delta l / l) \times U_1$ R面に $U_R = U_2 + (\Delta l / l) \times U_1$ の修正を施したのと同等である。

L面における誤差は $\Delta U_L = U_L - U_1 = -(\Delta l / l) U_1 \dots 1$

R面における誤差は $\Delta U_R = U_R - U_2 = (\Delta l / l) U_1 \dots 2$

となり、偶不釣合いが残留する事になる。

2) 修正面誤差による影響は、修正を誤った面に生ずるのはもちろんであるが、正しい修正を行った面にも同じ量の残留不釣合いが発生する事である。

3) 上記の1)、2)式から修正面誤差は、 Δl が大きいほど、 l が小さいほど大きくなるので、修正面はできるだけ離れた2面を選択するのが望ましい。

4) ロータの端面から軸方向に深いネジ穴(バランス修正用)を加工すると、修正面誤差が発生しやすい。

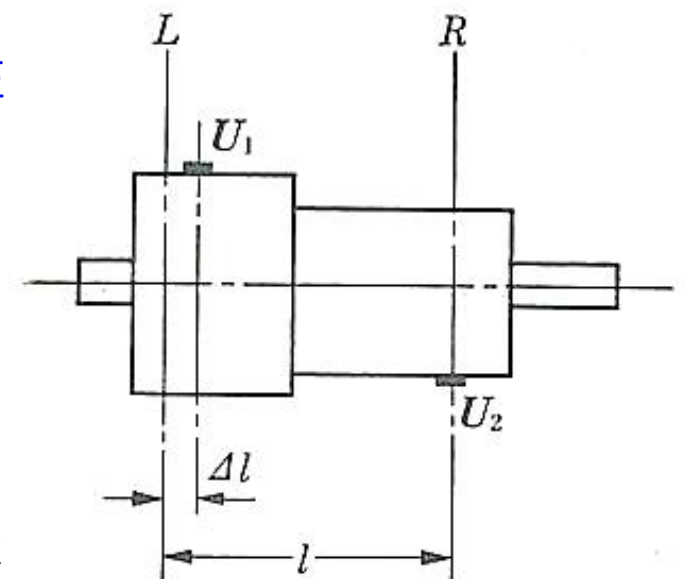
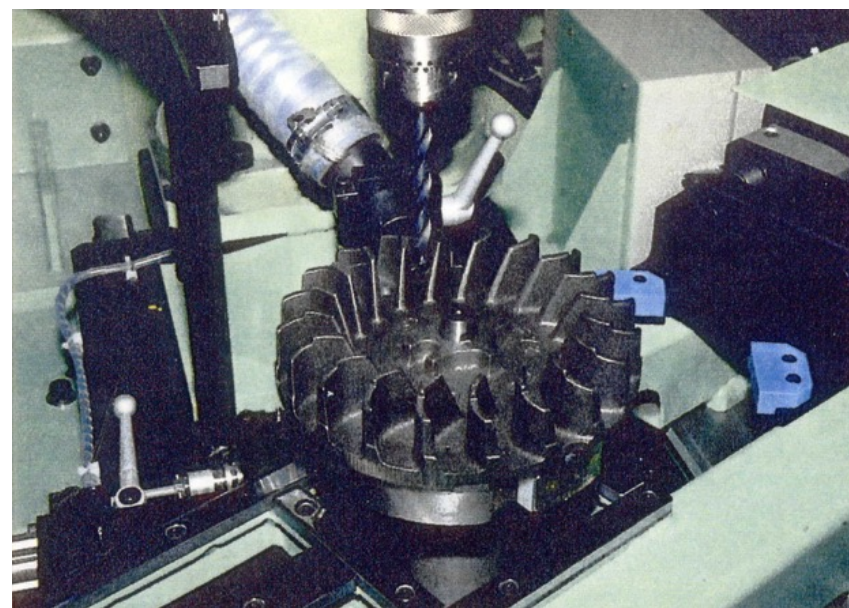
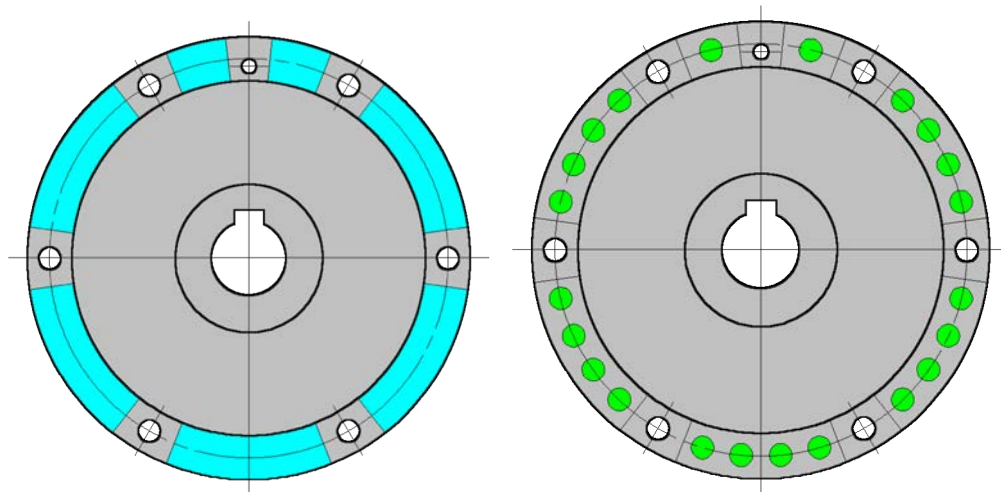


図4

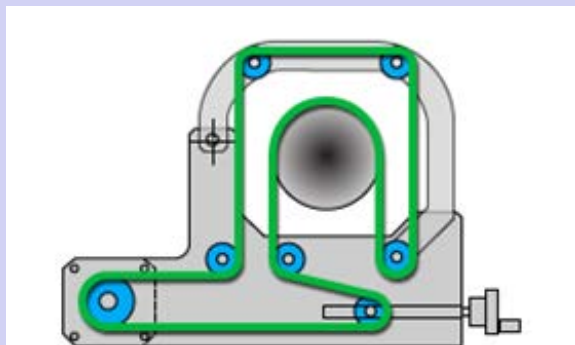
不釣り合い修正ができる個所が制限されるとき
自動車部品、プロペラの羽根など

制限個所を除いて分力修正を行う（等分力・不等分力修正）

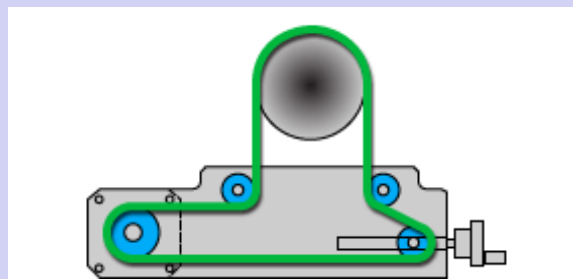


ベルトによるワークの回転駆動方式

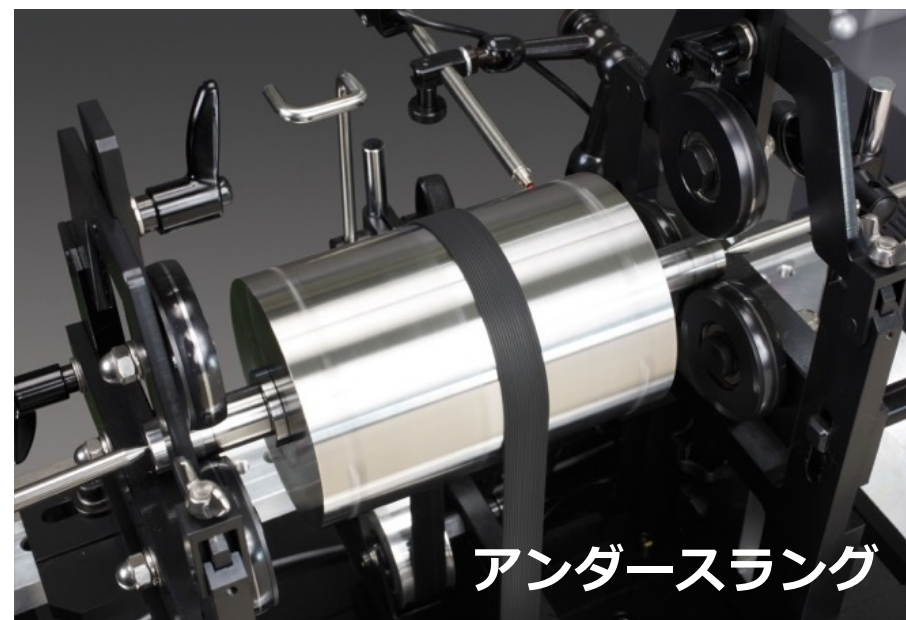
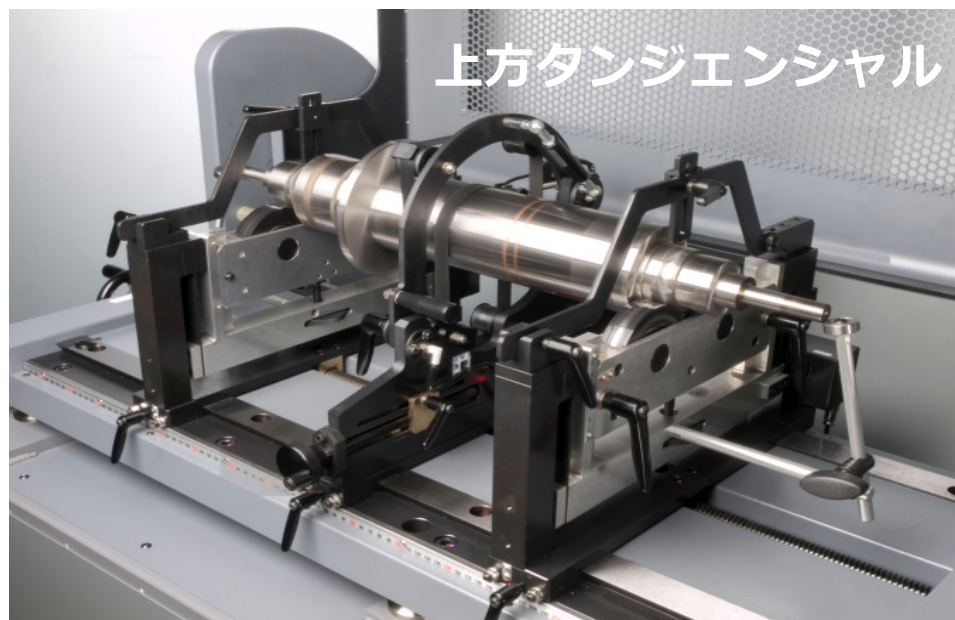
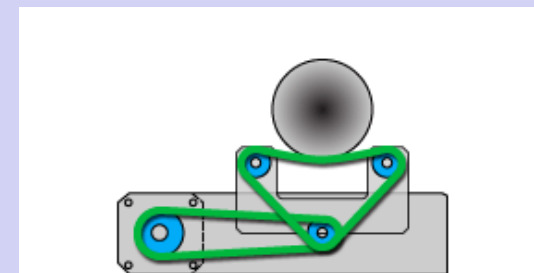
上方タンジェンシャル



アンダースラング



下方タンジェンシャル



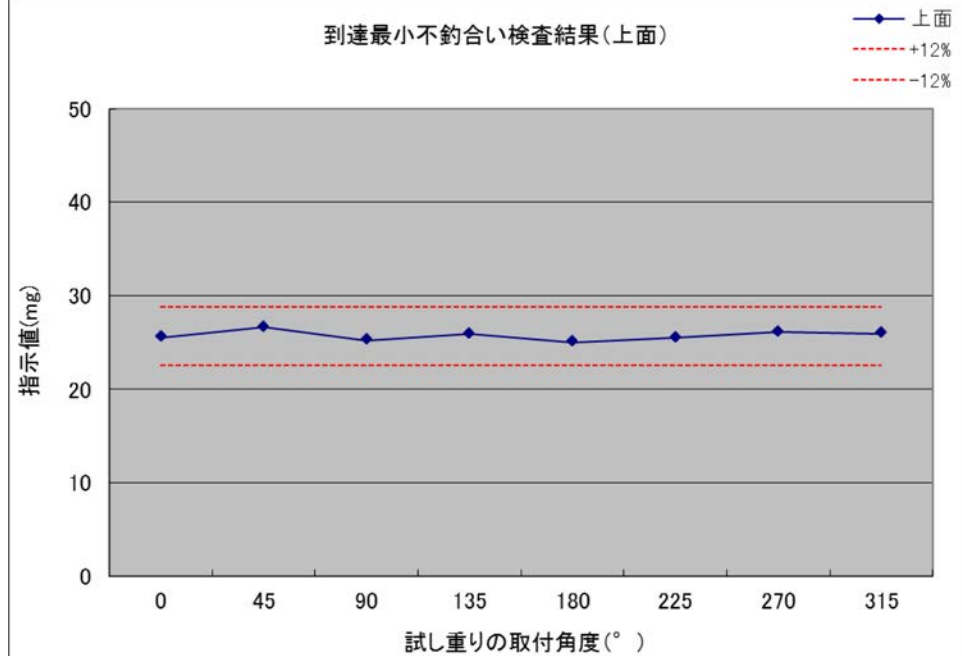
釣合い試験機の仕様に基づいて、各試験条件を決定する。

動釣合い試験機 検査成績書		シグマ電子工業株式会社	
横形二面機：型式SSB-6001A		製造No.：155737	
ワーク名称：検査ロータ		気温：24℃ 湿度：75%	検査日：15.05.19
	項目	記号	値
試験条件	検定ロータ質量 [g]	M	500
	試しおもり取付位置半径 [mm]	R	9.5
	試しおもり取付面間距離 [mm]		
	回転速度と回転方向 [rpm] 半時計廻り	N	2500
	呼び到達最小比不釣合 [μ m]	e mar	0.1
	呼び到達最小不釣合い [mg-mm] $U_{mar}=e_{mar} \times M$	U mar	50
	呼び不釣合い低減比 [%]	U rr	90%
	呼び到達最小不釣合い質量 [mmg]	m ₀	5.26
	到達最小不釣合い検査用試しおもり [mmg] $m_1=5e_{mar} \times M/R$	m ₁	26.32
	m ₂ 係数(10~25)	k m ₂	10
	不釣合い低減比検査用試しおもり [mg] $m_2=10e_{mar} \times M/R$	m ₂	52.63
	許容円半径 [mm] $r_{t2}=1/2 \times (e_{mar} \times M/R) + (1-0.9) \times m_2$	r t ₂	7.9
	m ₃ 係数(50~250)	K m ₃	50
不釣合い低減比検査用試しおもり [mg] $m_3=50e_{mar} \times M/R$	m ₃	263.2	
許容円半径 [mm] $r_{t3}=1/2 \times (e_{mar} \times M/R) + (1-0.9) \times m_3$	r t ₃	28.9	

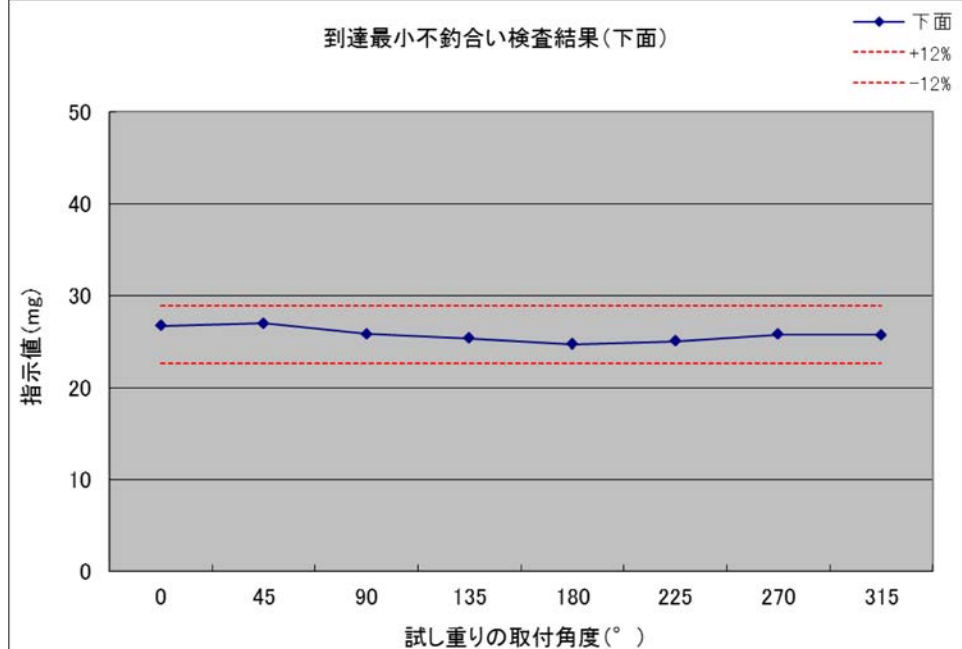
到達最小不釣り合い検査

測定データ											
量校正点 (検定ロータの0° にm3を取付けた時の指示値)											
検定おもり(m3)		263.0									
		上		下		サンプル数: 6 周期数: 20 繰返し回数: 5					
量指示 (div)		263		260.9							
量単位(g/div)		mg		mg							
角度指示(°)		0		358							
到達最小不釣り合い検査						不釣り合い低減比検査(m2)					
検定おもり(m1)		26.00				検定おもり(m2)		53.00			
項目	測定値				取付角度		上不釣り合い指示値		下不釣り合い指示値		
	上量指示値		下量指示値		上	下	角度(°)	量(mg)	角度(°)	量(mg)	
取付角度θ1	0	357	25.50	359	26.70	0	90	0	51.83	86	50.85
取付角度θ2	45	45	26.61	41	26.96	90	180	92	51.43	179	50.59
取付角度θ3	90	91	25.19	86	25.77	180	270	182	51.15	268	51.28
取付角度θ4	135	134	25.88	132	25.30	270	0	272	49.82	357	51.67
取付角度θ5	180	183	24.98	177	24.69	不釣り合い低減比検査(m3)					
取付角度θ6	225	228	25.45	227	24.99	検定おもり(m3)		263.0			
取付角度θ7	270	273	26.09	270	25.72	取付角度		上不釣り合い指示値		下不釣り合い指示値	
取付角度θ8	315	317	25.92	314	25.68	上	下	角度(°)	量(mg)	角度(°)	量(mg)
最大値		26.61		26.96		45	135	45	263.40	133	261.50
最小値		24.98		24.69		135	225	134	262.30	224	260.70
平均値		25.70		25.73		225	315	228	261.50	316	261.20
判定値	(+12%)	28.79		28.81		315	45	314	261.00	44	266.30
判定値	(-12%)	22.62		22.64				承認者	検査者		
判定 (OK/NG)		OK		OK							

到達最小不釣り合い検査結果(上面)



到達最小不釣り合い検査結果(下面)



不釣り合いの大きさと角度の指示精度、ならびに修正面分離の精度を検査する。
それぞれ測定結果が、許容円に入っていれば合格。

1) 0° 90° 180° 270° の位置に許容円を描く
許容円の半径は

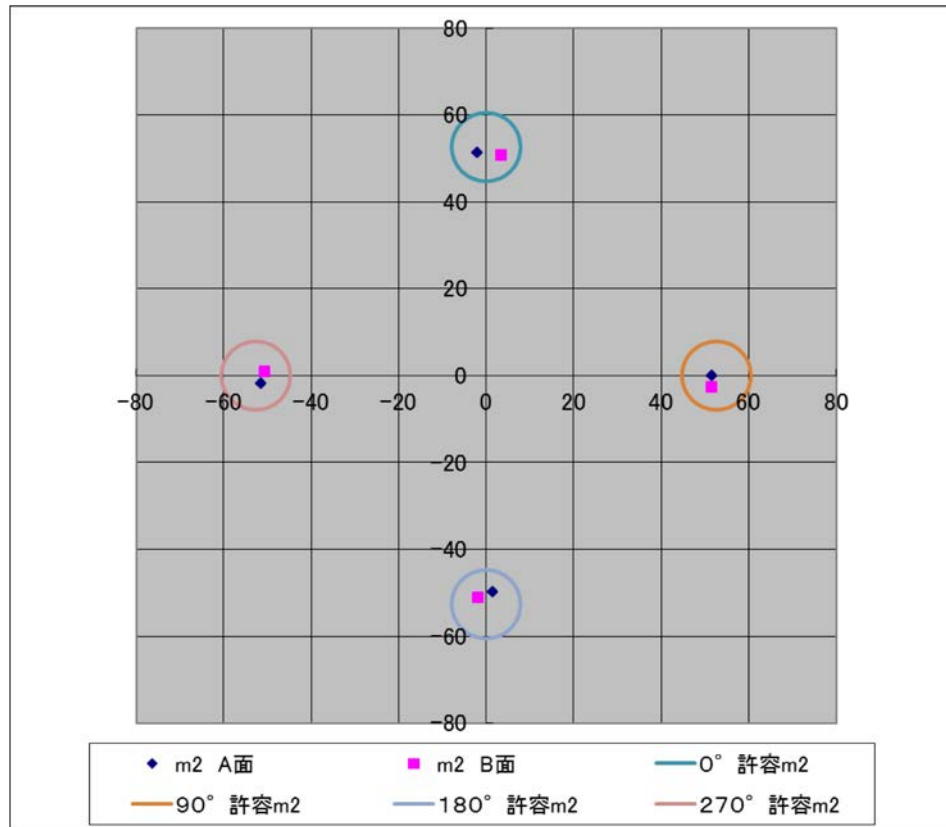
$$rt_2 = \frac{1}{2} \times (\text{emar} \times M/R) + (1 + 0.9) \times m_2$$

$$= 7.9 \quad \text{中心位置は } m_2 = 52.63$$

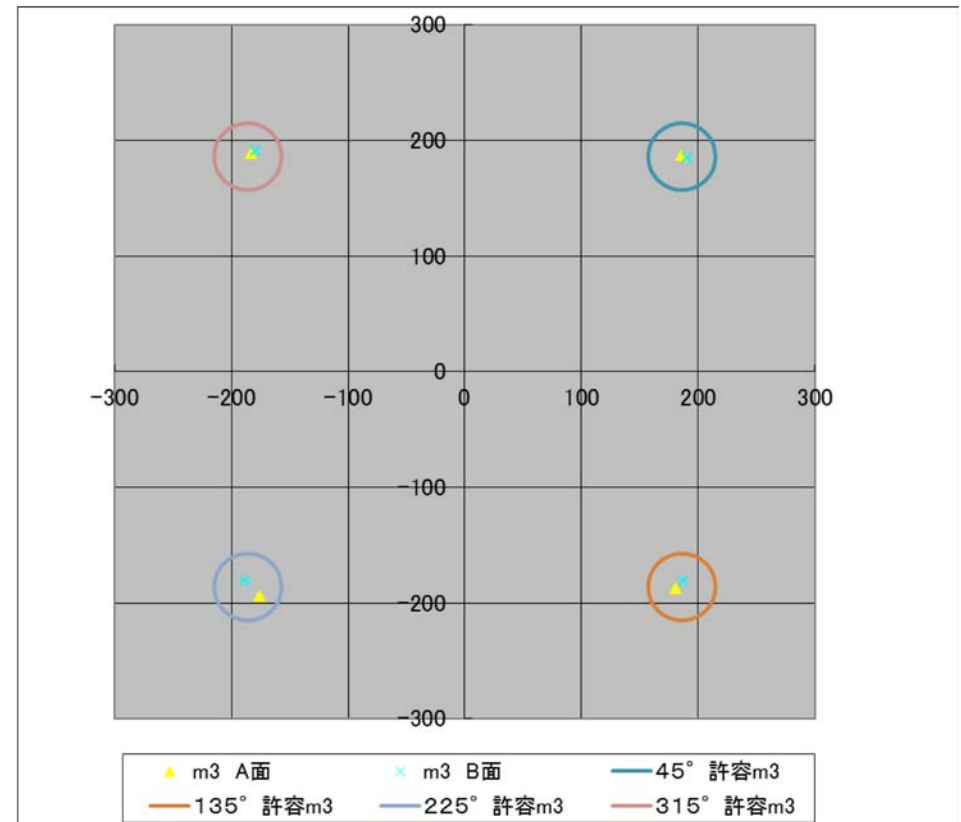
2) 45° 135° 225° 315° の位置に許容円を描く
許容円の半径は

$$rt_3 = \frac{1}{2} \times (\text{emar} \times M/R) + (1 + 0.9) \times m_3$$

$$= 28.9 \quad \text{中心位置は } m_3 = 263.2$$



不釣り合い低減比検査 [m2]



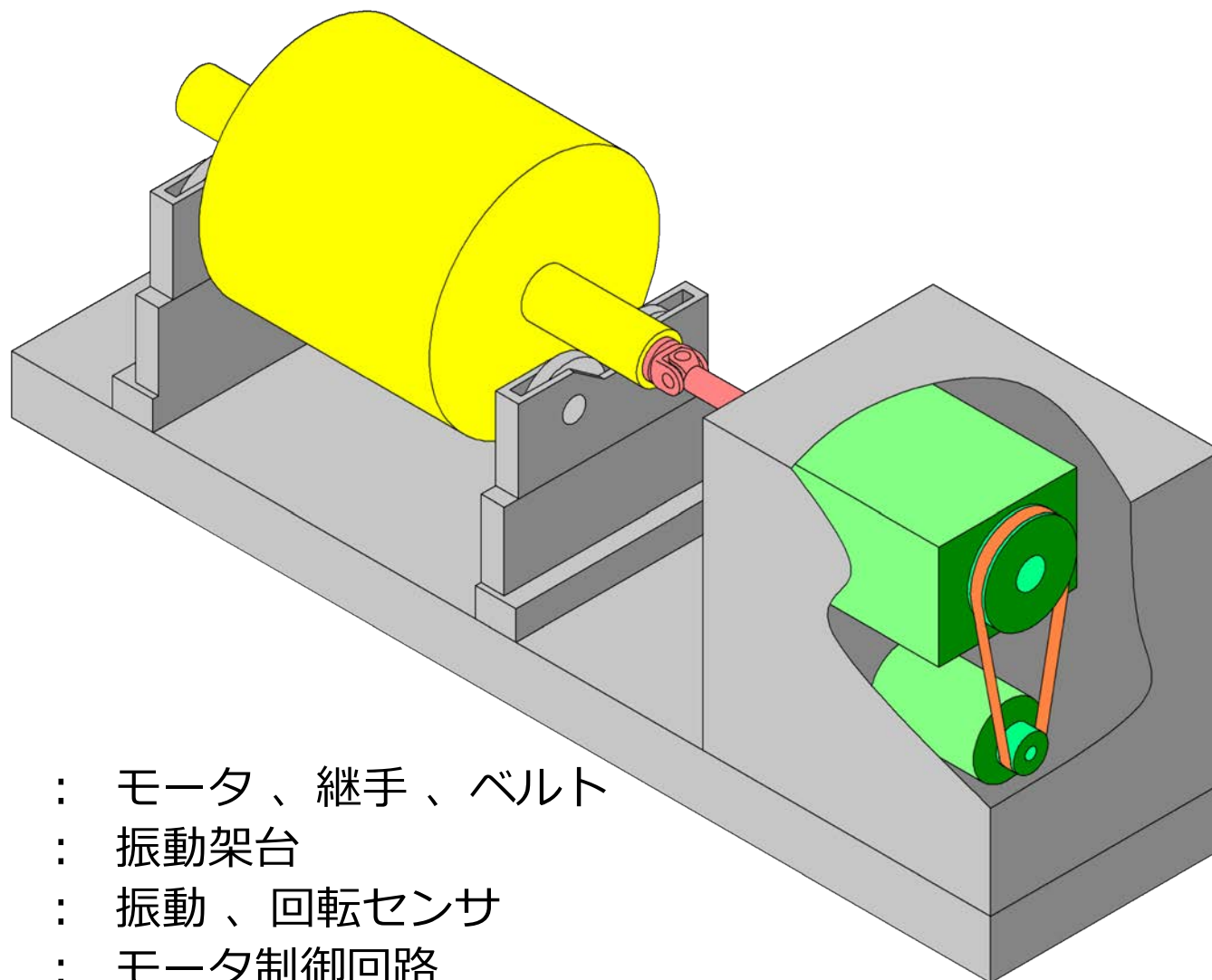
不釣り合い低減比検査 [m3]

横形：2つの軸受で支持

立形：軸のないワーク

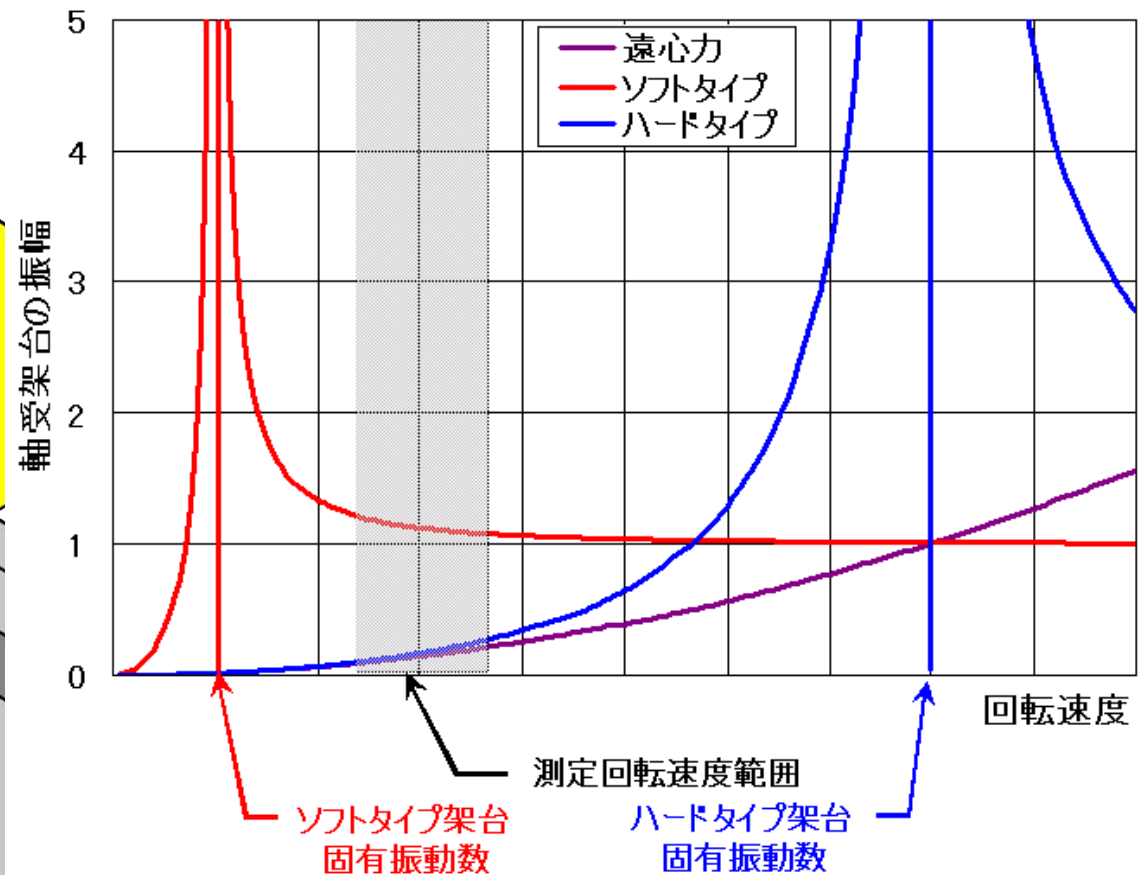
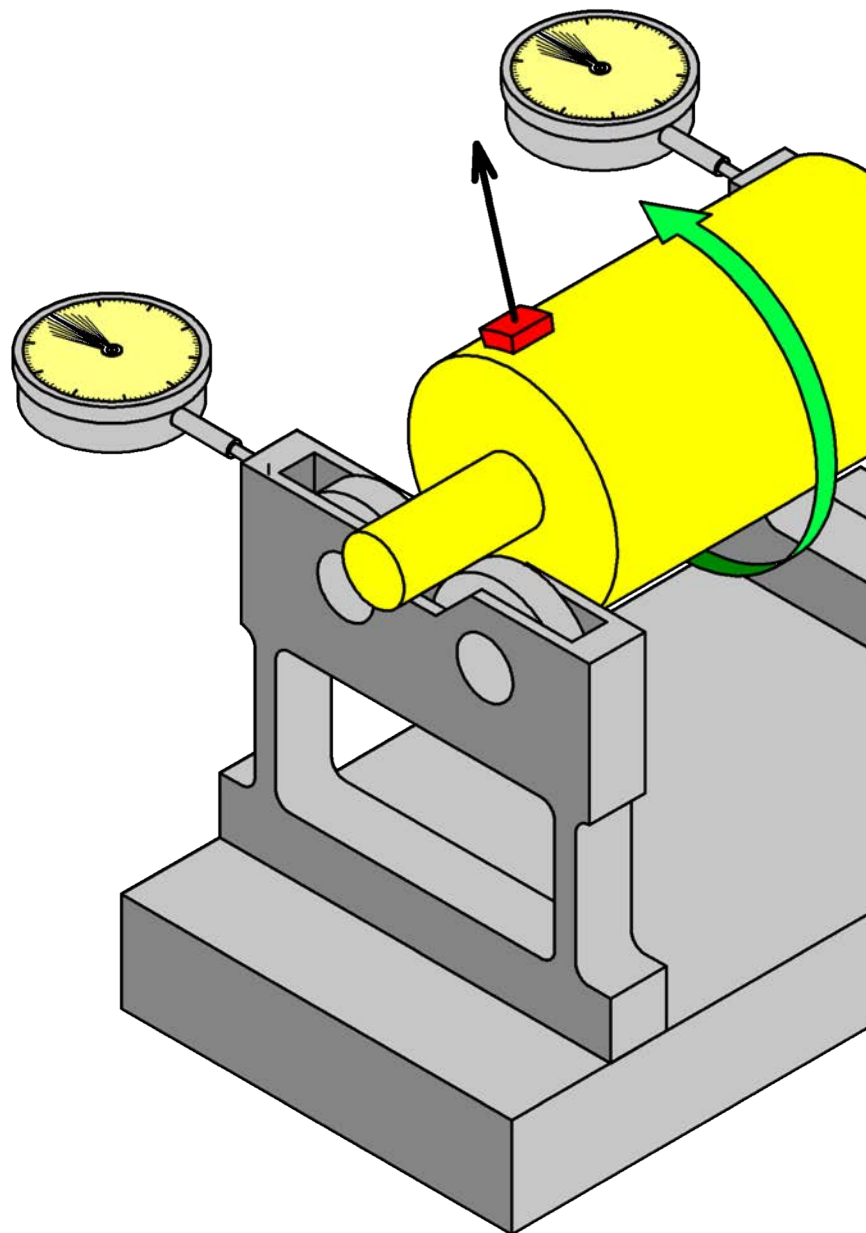
 2面釣合い試験機

 単面釣合い試験機



試験機の基本構成

回転駆動部	：	モータ、継手、ベルト
軸受ローラ・架台部	：	振動架台
不釣合い計測・表示部	：	振動、回転センサ
回転制御部	：	モータ制御回路



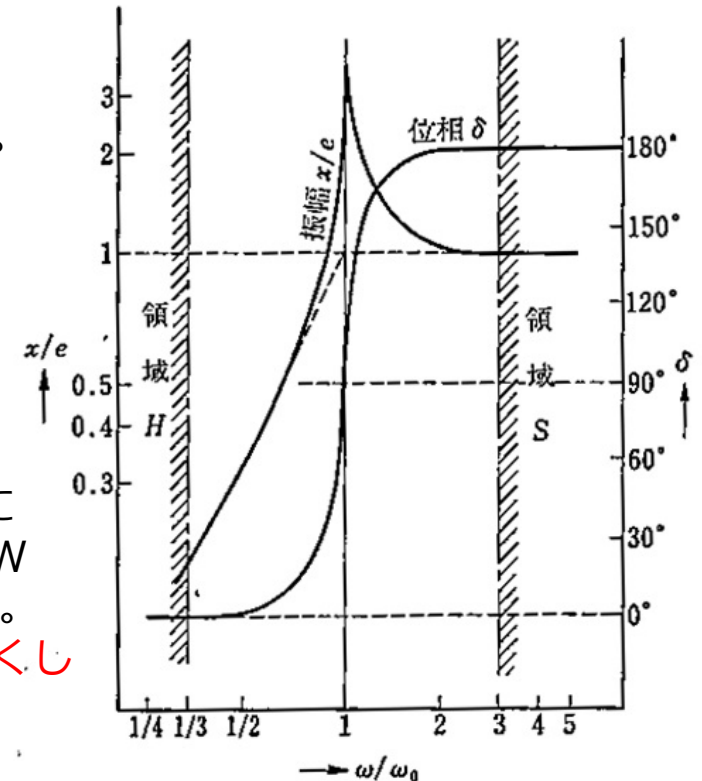
ばね支持で遠心力を振動に変換

強いバネ : ハード・セミハードタイプ

弱いバネ : ソフトタイプ

一般の釣合い試験機は、振動架台の持つ固有振動数 ω_0 と試験回転数 ω/ω_0 の関係から、ソフトタイプとハードタイプに分類できる。

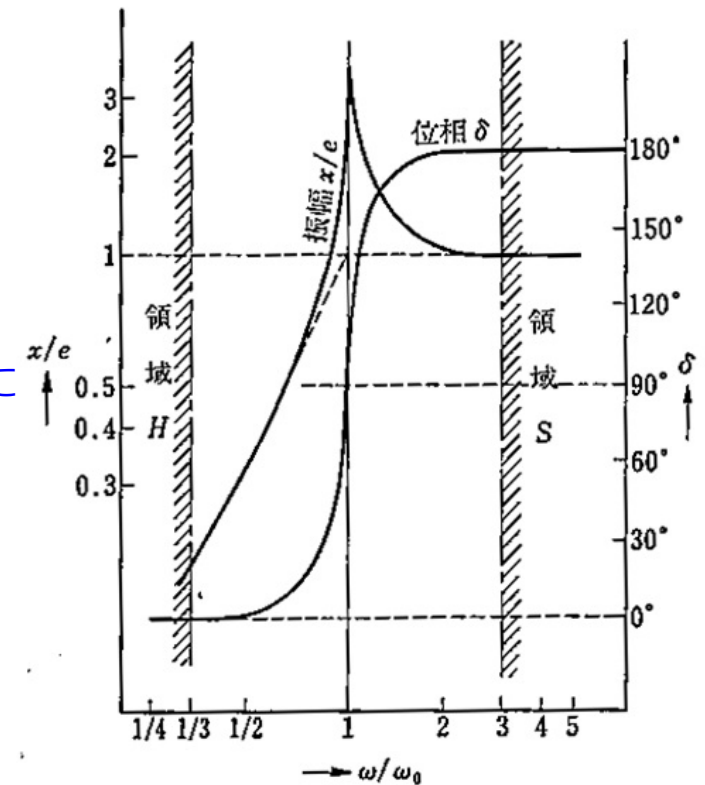
- ロータの質量を W 、軸受、振動架台等のロータ以外のバネ上質量を W_0 とし、これらをバネ定数 k のバネで支えてあるとする。但し、 $W+W_0 = W'$ 、 $k/W' = \omega_0^2$ とする。
- 不釣り合い量 U のロータを角速度 ω で回転した時の水平振動成分 x による遠心力は $F=We\omega^2$ で、この時の運動方程式の解は下図のようになる。($U=We$ e =偏重心)
- 右図のS領域が、ソフトタイプの領域で試験回転数 ω/ω_0 に比べて、振動架台の固有振動数 ω_0 を $1/3$ 以下にする。
- ソフトタイプの場合、 $(\omega/\omega_0)^2 \gg 1$ の回転領域であるので、水平振動成分 x 、即ち振動振幅 x は偏重心 e に比例する。 $x = -W / (W+W_0) \times e \cos \omega t$ -- 1)
- 1)式はロータの質量 W によって、振動振幅 x が変化する。つまり感度が増える事を意味している。ロータ質量 W に比べて、バネ上質量 W_0 が無視できるほど小さければ $W / (W+W_0) \approx 1$ で、ロータ質量に無関係になるが現実的ではない。いずれにしても、ソフトタイプの感度を上げるには W_0 を軽くしさらに、センサ感度を上げる必要がある。



ハードタイプの振動架台

一般の釣合い試験機は、振動架台の持つ固有振動数 ω_0 と試験回転数 ω/ω_0 の関係から、ソフトタイプとハードタイプに分類できる。

- ロータの質量を W 、軸受、振動架台等のロータ以外のバネ上質量を W_0 とし、これらをバネ定数 k のバネで支えてあるとする。但し、 $W+W_0 = W'$ 、 $k/W' = \omega_0^2$ とする。
- 不釣合い量 U のロータを角速度 ω で回転した時の水平振動成分 x による遠心力は $F=Wew\omega^2$ で、この時の運動方程式の解は下図のようになる。($U=We$ e =偏重心)
- 右図のH領域が、ハードタイプの領域で試験回転数 ω/ω_0 に比べて振動架台の固有振動数 ω_0 を3倍以上にする。
- ハードタイプの場合、 $(\omega/\omega_0)^2 \ll 1$ であるから、振幅 x は2)式で表され、振幅 x は遠心力 F に比例する。
 $x = F/k \times \cos\omega t$ 2) つまり、ハードタイプはロータ質量による振動振幅 x (感度)の低下はない。
- 一般の釣合い試験機では、ロータは水平面内で2自由度の振動をするから、固有振動数は2つある。上記の計算式は分かり易くするため1自由度として説明した。



1. ソフトタイプ釣合い試験機

36頁の1)式で求める事ができる。 $x = -W / (W + W_0) \times e \cos\omega t$ より

$e = -x (W + W_0) / W \cos\omega t$ 試験回転数を一定とすると $\cos\omega t = 1$ とすると

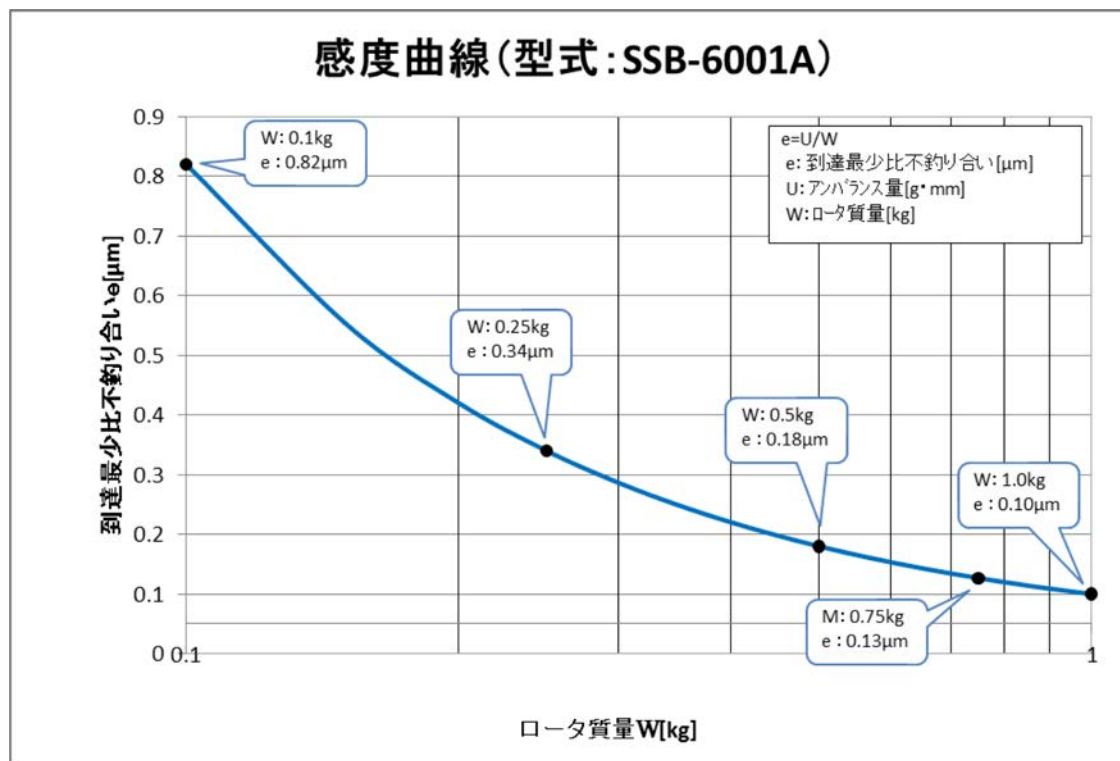
$$e = -x (W + W_0) / W$$

e : 偏重心 (到達最小比不釣り合い) μm

W : ロータ質量 kg

W_0 : バネ上質量 kg

x : バネ上の振動振幅 mm



1. ハードタイプ釣合い試験機

37頁の2)式で求める事ができる。 $F = W e_0 \omega^2$ $x = F / k \cos \omega t$ 2) 式

$x = W e_0 \omega^2 / k \cos \omega t$ $e_0 = x k / W \omega^2 \times \cos \omega t$ となる。

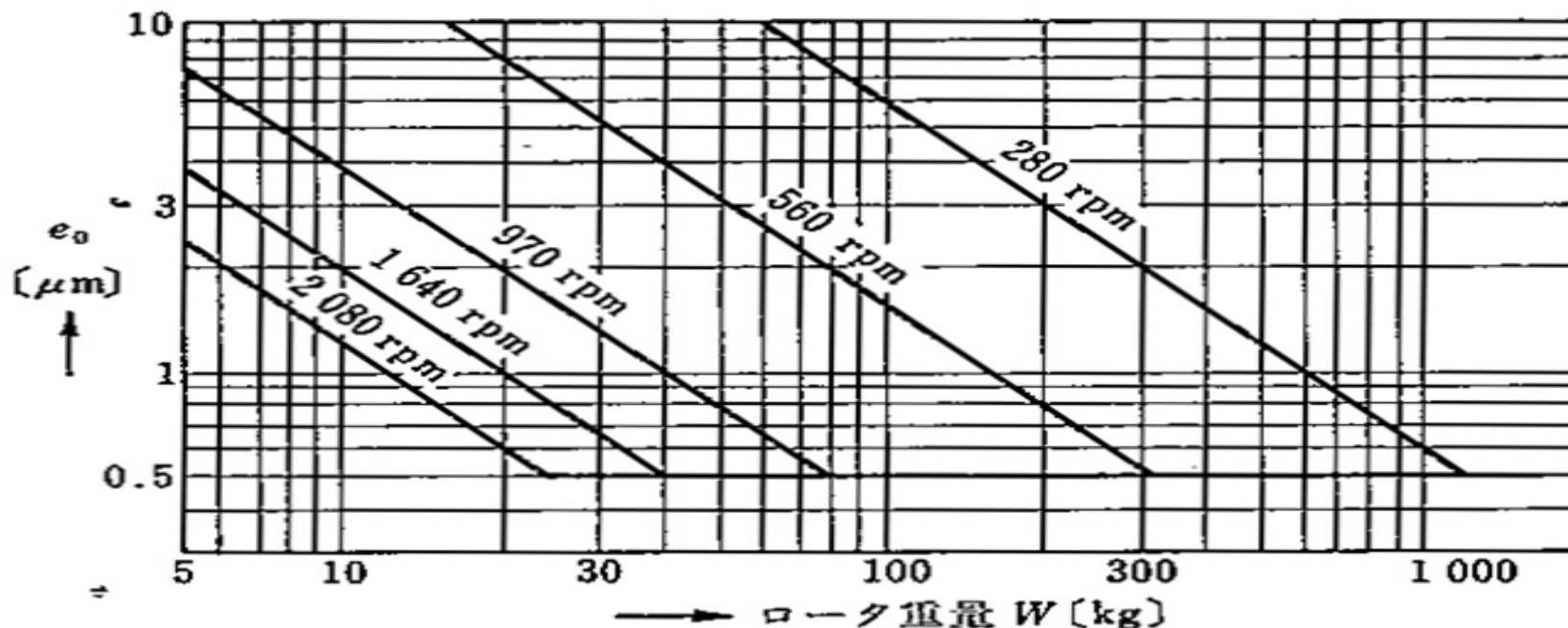
ここで、試験回転数を一定とすると $e_0 = x k / W \omega^2$

e_0 : 偏重心 (到達最小比不釣り合い) μm

W : ロータ質量 kg

x : バネ上の振動振幅 mm

k : 振動台のバネ定数

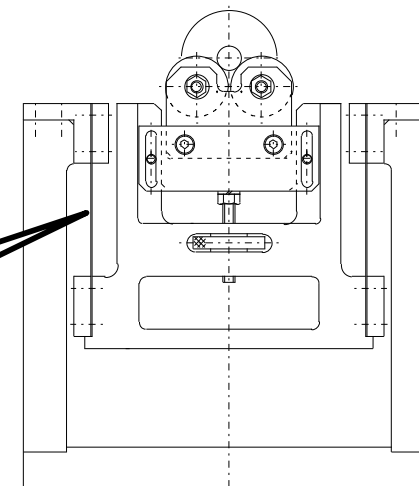


ロータ重量を支えるだけの強度を持ち、曲げ剛性が小さいバネを設計する必要がある。

1. 吊下げ方式の振動架台

一般的な方式で、ロータ重量も数 g から数100kg で到達最小不釣合い $U_{\text{mar}} = 0.05\mu\text{m}$ の高精度な釣合い試験機も構成可能である。

吊下げバネ

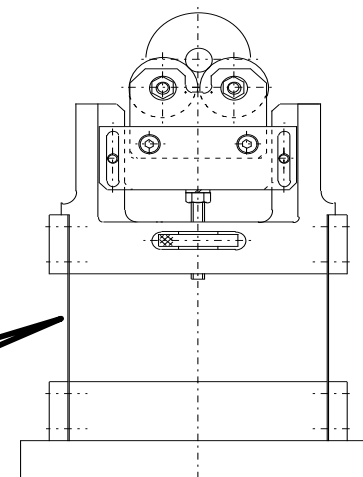


2. 倒立バネ方式の振動架台

吊下げバネ方式に比較して**構造は簡単**になるがロータの**重量が大きくなるとバネが座屈する**恐れがある。

従って、倒立バネ方式はソフトタイプ釣合い試験機には、適さないとされ、一般的には**ハードタイプの立形釣合い試験機**に使用されている。

倒立バネ



3. 舟形振動台

回転体の釣合わせは回転体が剛体であれば、その質量中心軸と回転中心軸を一致させればよいが、軸受間隔、軸受条件などによって回転体を剛体と見なすことが出来ない場合には、左右の振動架台を剛結合した舟形振動台を用いる。

- 1) 図 1の吊下げ式舟形振動台はバネ上質量は不明であるが、軸受ハウジング構造であるので軸受間の剛性も高く、温度変化にも強く、高い精度が期待できる。
- 2) 図 2は倒立式の舟形振動台である、2つの軸受け間の剛性が低いことが予想され、温度変化の影響を受けやすい。

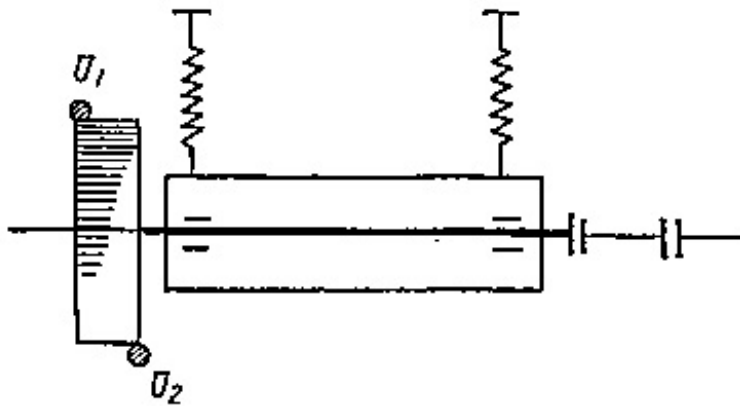


図 1 吊下げ式の舟形振動台

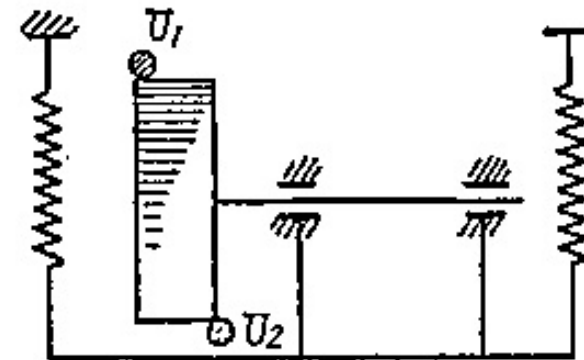


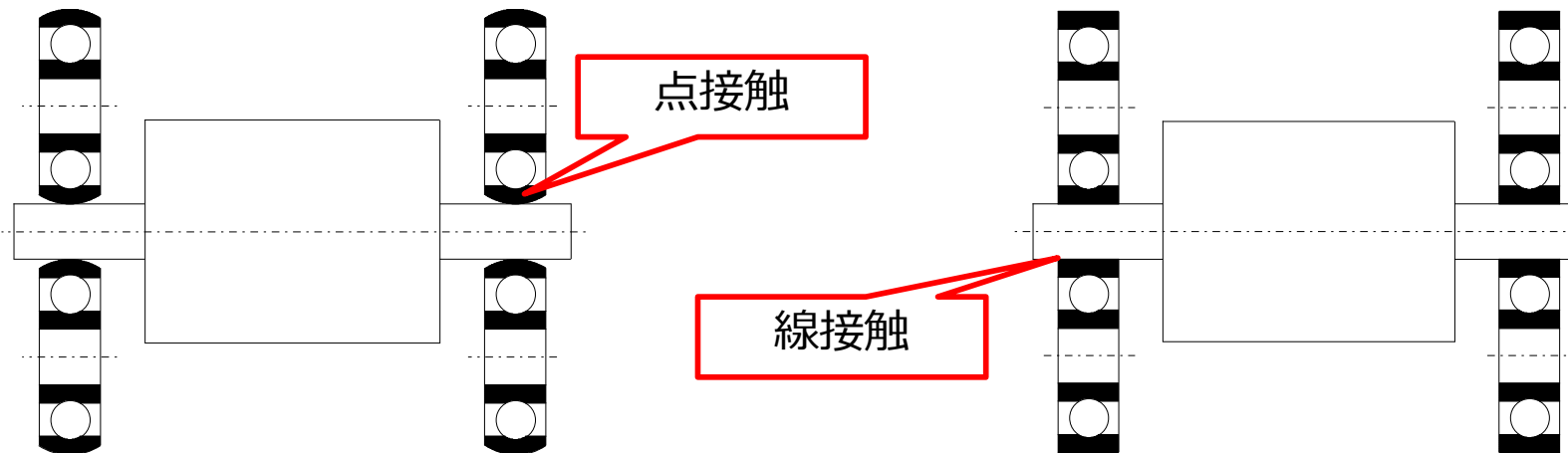
図 2 倒立バネ式の舟形振動台

1. ソフトタイプ釣合試験機

不釣合いの大きいロータの場合、振動振幅が大きくなる。しかも、ロータに偶不釣合いが存在する時には、ロータ軸が二つのローラに対して角変位を起こし、安定した不釣合い測定が出来なくなる。このためローラの外周は下図に示す様に、円筒面ではなくR面加工を施す必要がある。

2. ハードタイプ釣合試験機

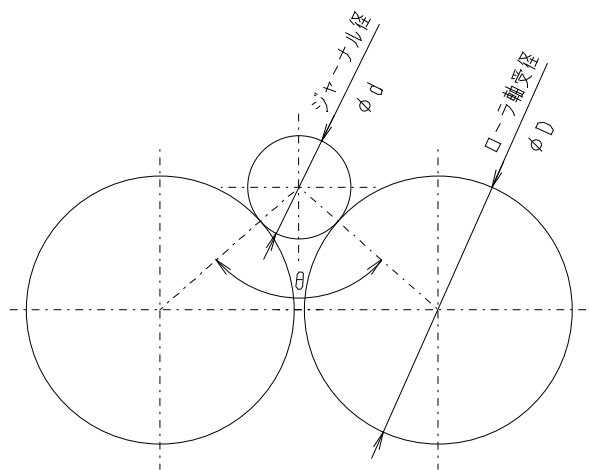
軸変位が小さいので、R面加工は不要であるが、左右両軸受けのアライメントを考慮するとR面加工を施した方が良い。



R面加工された軸受ローラ

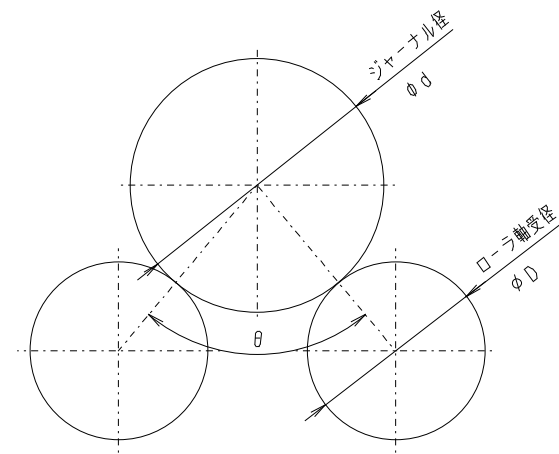
R面加工がされていない軸受ローラ

1. ローラ直径とロータ軸径の値が近い時には、**不釣合い測定が不安定**になるので注意を要する。その理由は、ローラ外周のふれは、高精度な軸受を使用して**高精度なR加工を施しても、数 μm 程度のふれを生ずる**のは避けられない。
2. 1項のようなローラ上で、ロータを回転させた時に、ローラ軸が持つ不釣合い振動とロータの不釣合い振動から「**うねり振動**」を発生させ、計測精度を低下させる。
3. ローラ直径とロータ軸径とが接近してはならず、**目安として20%以上の差が必要**である。一般的には**ローラ直径の方がロータ軸径より大きい事が望ましい**が特殊なロータで軸径が非常に大きい場合は、その逆を利用する事もある。

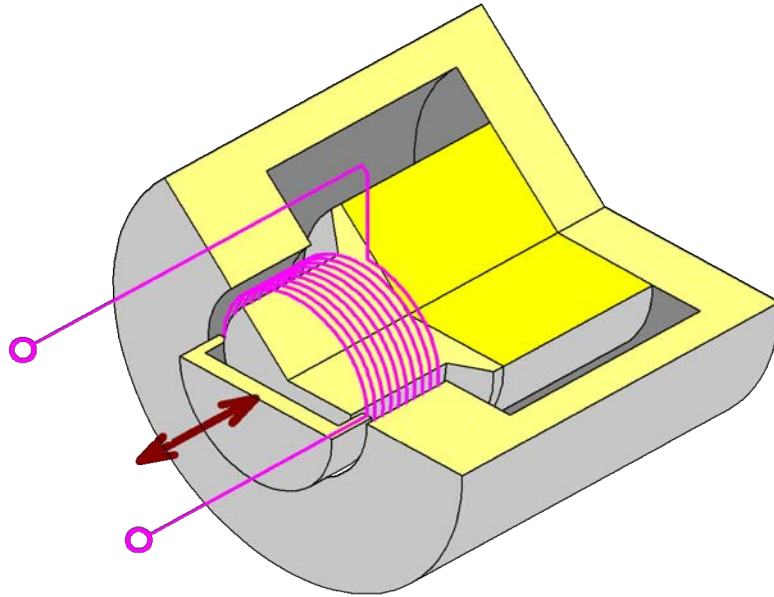


$$1.2D < d < 0.8D$$

$$60^\circ < \theta < 120^\circ$$

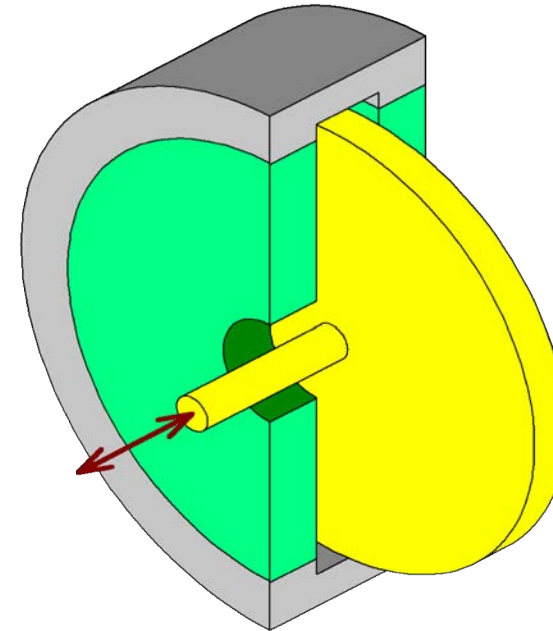


1. ISO、JIS の釣合わせに関する規格は、剛性回転体の釣合わせとして制定されている。
2. 従って、剛性回転体であれば、いずれの回転数で釣合わせしても良いので一般的には、実用回転数が50,000rpmの試験体であっても、使用する釣合い試験機の最高試験回転数、例えば3,000rpmで行っているのが実情である。
3. 許容不釣合い量 U は、試験回転数ではなく、実用最高回転数で求める必要がある。その計算例を下記に示す。
釣合いの良さを G1.0、ワークの質量を3kg、実用最高回転数を 50,000rpm とすると、許容不釣合い量 U は $U = 9.55 \times 3,000 \text{g} \times 1.0 \text{mm/s} \div 50,000 \text{rpm} = 0.573 \text{g-mm}$ と厳しい値となる。
4. 実用的には、釣合い試験機で粗バランス修正を、機械組立後にフィールドバランスを用いて、全回転域の精密バランス修正をするのが能率的で経済的な手段である。
5. 自己駆動の回転機械は、専用釣合い試験機を用いて、全実用回転域に亘り、バランスを実施するのが理想的である。



動電形

- 1) 一般的に高信頼性
- 2) 磁性体ワークで計測精度が劣化
- 3) 低速回転域で計測精度が劣化



非接触光電形

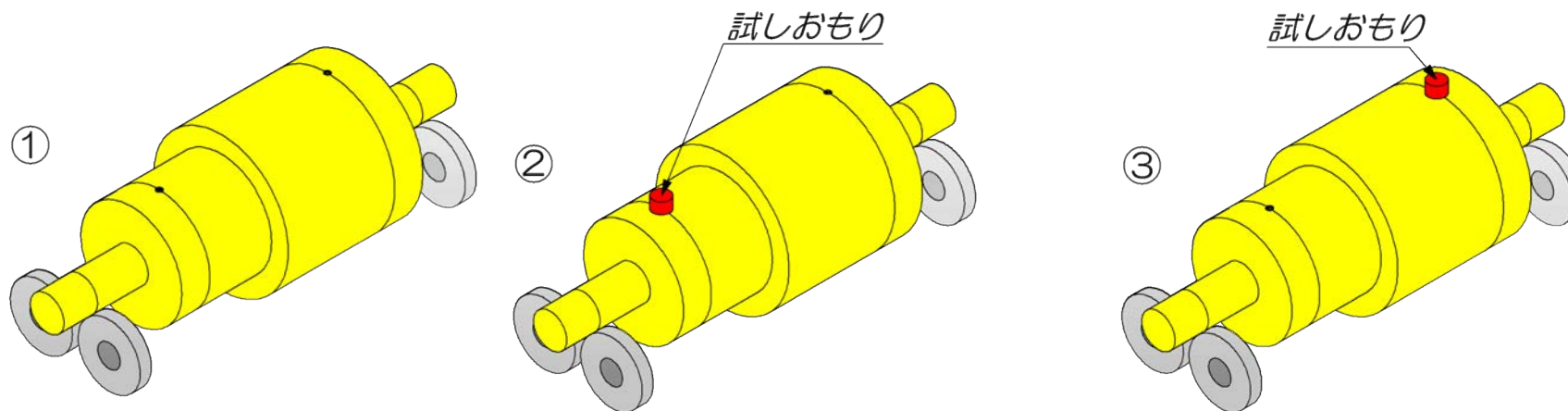
- 1) 高感度である
- 2) 磁性体ワークで精度劣化しない
- 3) 低速から高速域まで精度劣化しない

長所

1. 校正済みのワークはハードタイプと同様に、試運転・試測定は不要
2. ソフト形釣合い試験機は、ワーク種毎の校正のみで良いので、精度維持が容易
3. 外乱振動の影響が少なく、高精度で特別な基礎も不要
4. 小型ワークで、大量生産向き

欠点

1. 導入時にワーク種毎、3回の試運転「校正」が必要

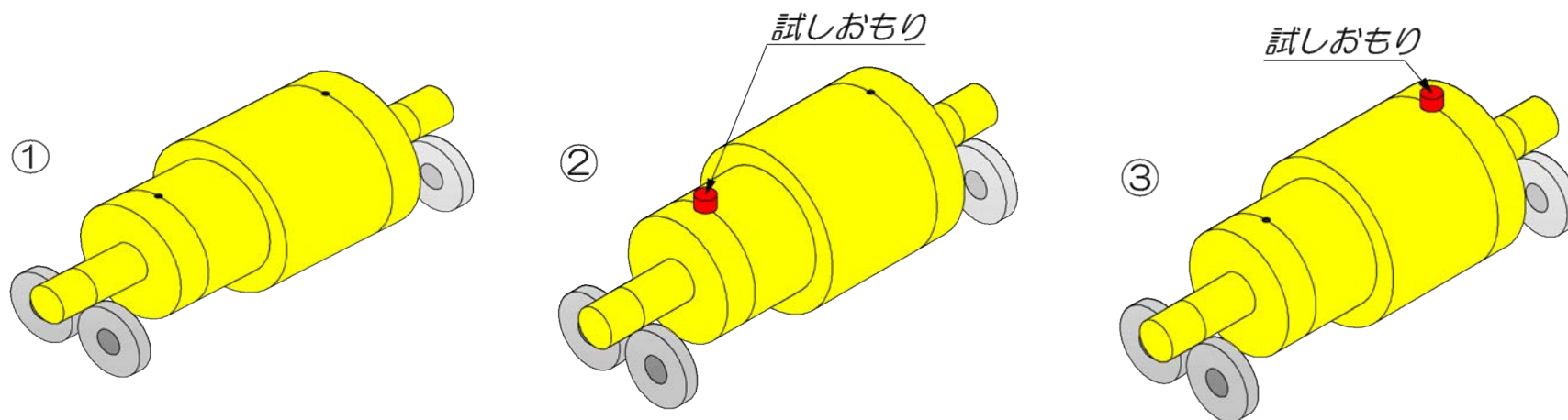


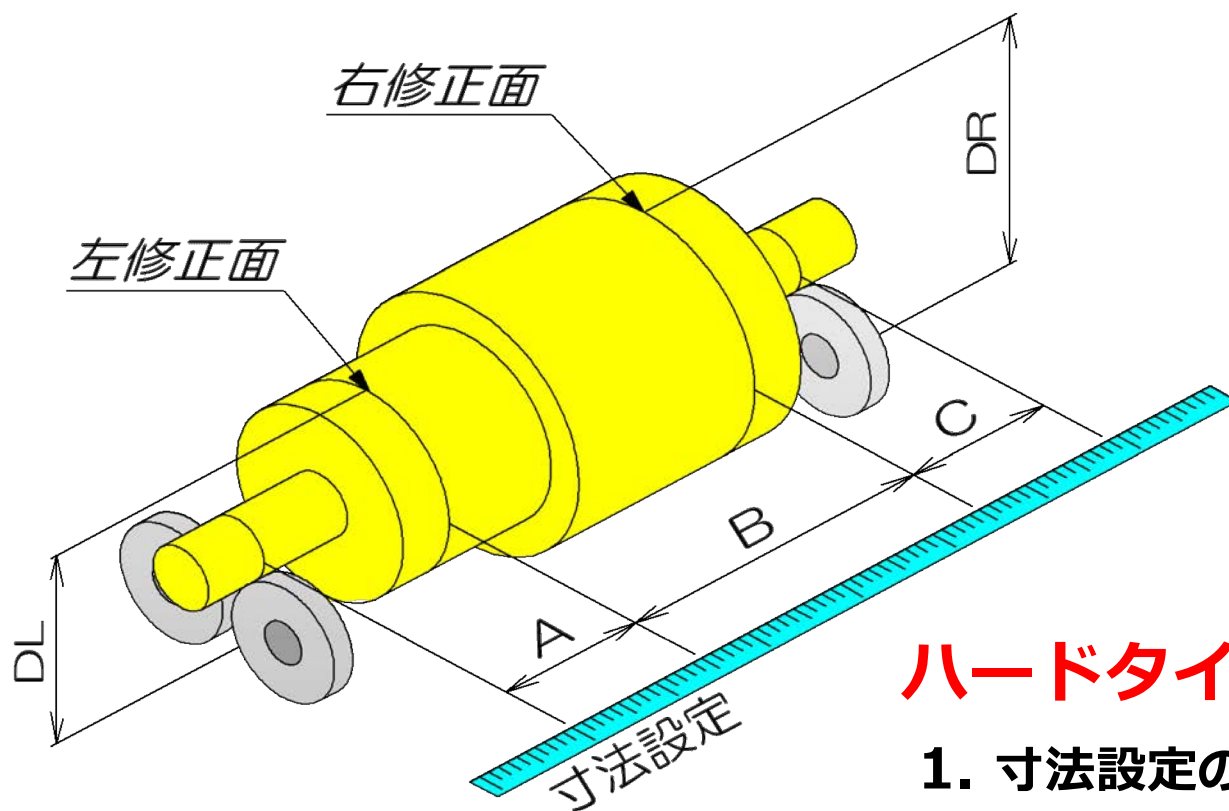
長所

1. 校正終了後は、**ハード形釣合い試験機と同様**、ワーク寸法諸元の設定変更のみで、**種々のワークに対応**できる。
2. 老朽化したセミハード形釣合い試験機は、**テストロータによる校正のみで良い**ので、**保守が容易**である。

欠点

1. 導入時にテストロータによる、**3回の試運転「校正が必要**である。





ハードタイプの長所

1. 寸法設定のみで、試運転・試測定は不要
2. 大型ロータ多種少量生産向き

ハードタイプの欠点

1. 外乱振動に敏感
2. 高精度を得るには専用基礎が必要
3. 老朽化した場合の校正作業は複雑

到達最小比不釣合い e_{mar} ; μm

到達最小不釣合い U_{mar} ; $\text{g}\cdot\text{mm}$

釣合い試験機で、修正し得る最小の不釣合いで

「何回かの修正を繰り返せば、ここまで釣合わすことができる」

という 釣合い試験機の実力値

通常 : $0.1\sim 1\mu\text{m}$ (到達最小比不釣合い e_{mar})

不釣合い低減比 U_{RR}

一回の修正で「不釣合いを何パーセント減らす事ができる」という実力値

通常 : $90\sim 95\%$

ISO,JISによると剛性ロータの釣合い良さの等級は、その**最高使用回転速度**に応じて、ロータの「許容不釣合いU」と定められている。
以下に、その「許容不釣合いU」の計算例を示す。

1. ロータの種類を選定 ⇒ 砥石軸 **釣合い良さ G = 1.0**

2. 使用最高回転速度 ⇒ **N = 30,000 rpm**

3. ロータの質量 ⇒ **M = 3kg = 3,000 g**

の条件で、「許容不釣合い量U」を求める

$U = 9.55 \times G \times M / N \text{ (rpm)}$ から

$$U = 9.55 \times 3,000 \text{ (g)} \times 1.0 \text{ (mm/s)} \div 30,000 \text{ (rpm)} = 0.955 \text{g} \cdot \text{mm}$$

$$\therefore U = 0.955 \text{g} \cdot \text{mm}$$

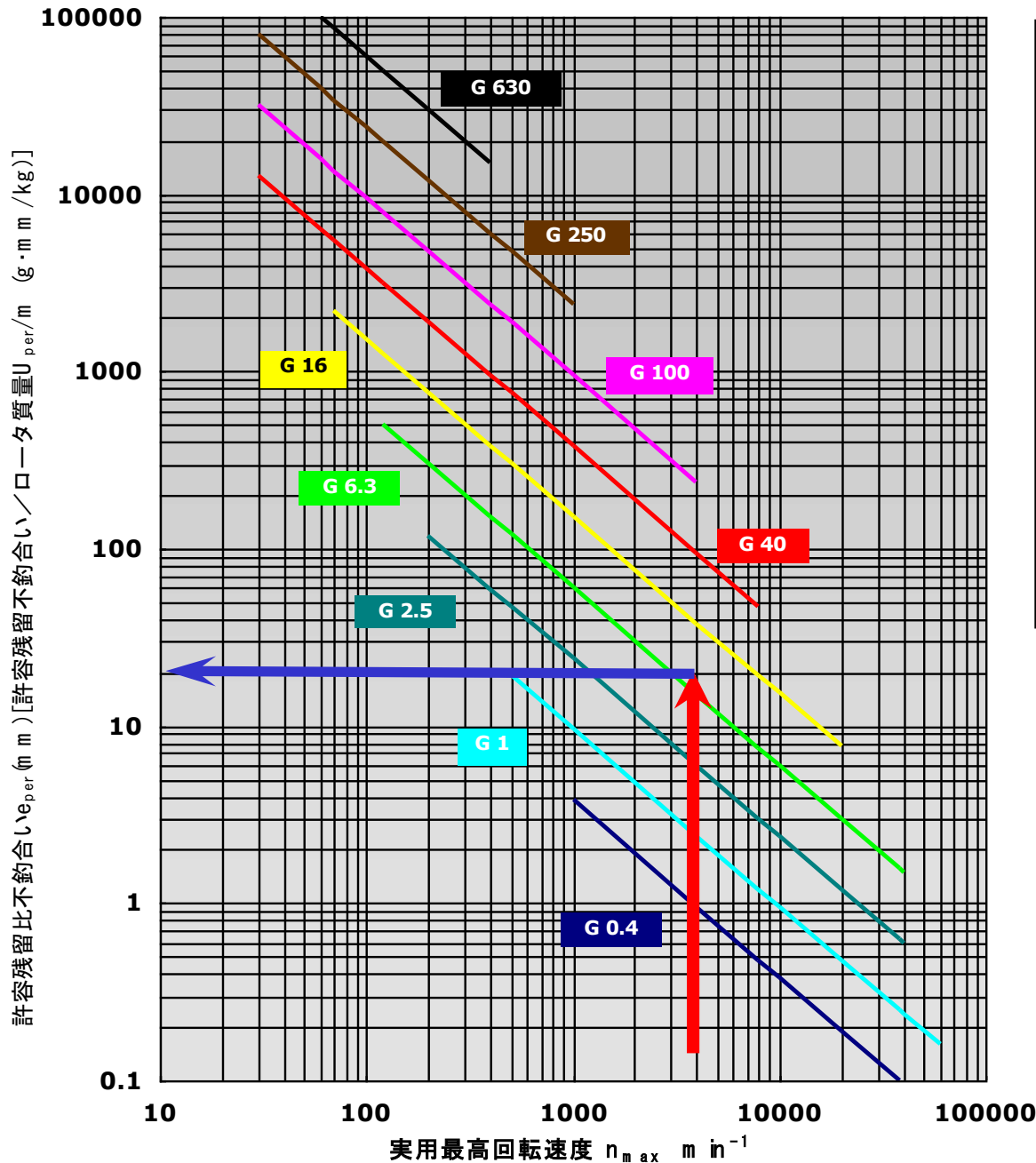
釣合い良さ, Balance Quality

「G××」

××の値が小さいほど精密な釣合わせが必要

釣合い良さの等級	釣合い良さの上限値 mm/s ($e_{per} \times \omega$)	ロータの種類一例
G4000	4000	剛支持されたシリンダ数奇数の船用低速ディーゼル機関のクランク軸系
G1600	1600	剛支持された大形2サイクル機関のクランク軸系
G630	630	剛支持された大形4サイクル機関のクランク軸系 弾性支持された船用ディーゼル機関のクランク軸系
G250	250	剛支持された高速4シリンダディーゼル機関のクランク軸系
G100	100	6シリンダ以上の高速ディーゼル機関のクランク軸系 自動車、トラック及び鉄道車両用機関(ガソリン又はディーゼル)の完成品
G40	40	自動車用車輪、リム、ホイールセット及び駆動軸 弾性支持された6シリンダ以上の高速4サイクル機関(ガソリン又はディーゼル)のクランク軸系 自動車、トラック及び鉄道車両用機関のクランク軸系
G16	16	特別の要求がある駆動軸(プロペラ軸、カルダン軸) 圧碎機の部品 農業機械の部品 自動車、トラック及び鉄道車両用(ガソリン又はディーゼル)機関の部品 特別な要求がある6シリンダ以上のクランク軸系

G6.3	6.3	<p>プロセスプラント用機器 船用主機タービン歯車(商船用) 遠心分離機ドラム 製紙ロール, 印刷ロール ファン, ポンプ羽根車, はずみ車 組立て後の航空機ガスタービンロータ 工作機械及び一般機械の部品 特別の要求がない中形及び大形(少なくとも 80 mm 以上の軸中心高さをもつ電動機の)電機子 振動に敏感でない使われ方や, 振動絶縁を施してある(主として量産形の)小形電機子 特別の要求がある機関の部品</p>
G2.5	2.5	<p>ガスタービン, 蒸気タービン及び船用主機タービン(商船用) 剛性ターボ発電機ロータ 計算機用記憶ドラム及びディスク ターボ圧縮機 工作機械主軸 特別の要求がある中形及び大形電機子 小形電機子(G6.3 及び G1 の条件のものを除く。) タービン駆動ポンプ</p>
G1	1	<p>テープレコーダ及び音響機器の回転部 研削盤のといし軸 特別の要求がある小形電機子</p>
G0.4	0.4	<p>精密研削盤のといし軸、といし車及び電機子 ジャイロスコープ</p>



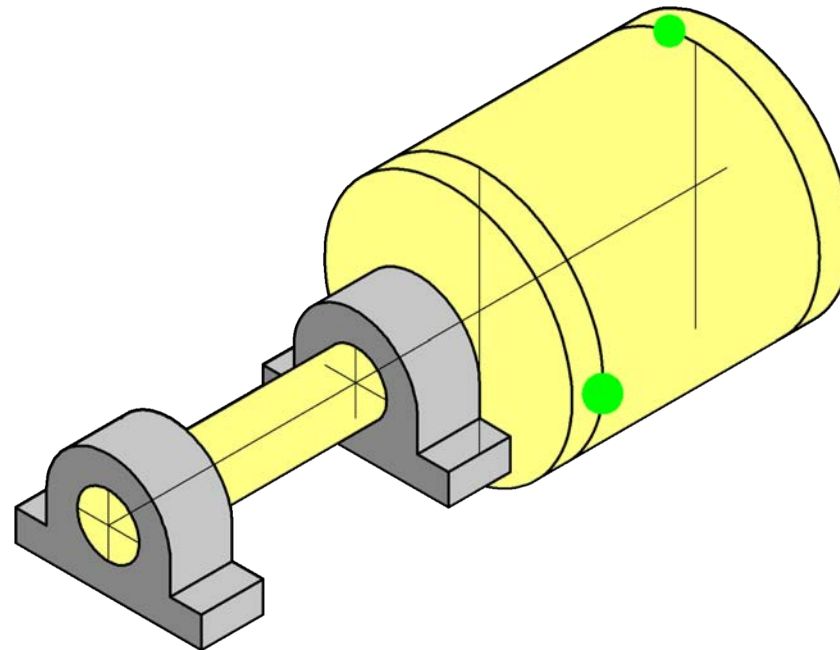
例題 - 1 許容残留比不釣合いから 「許容不釣合い」 U を求めると

1. 使用最高回転速度 $N = 3,000\text{rpm}$
2. 釣合い良さ等級 $G = 6.3$
3. ロータの質量 $M = 10,000\text{g}$
左図から、上記1,2の条件で許容残留比不釣合いは $e = 20\mu\text{m}$ が得られる。
4. ここで、ロータ質量は $M = 10,000\text{g}$ であるので、許容不釣合いは、 $U = e \times M$ であるので
 $U = 0.02\text{mm} \times 10,000\text{g} = 200\text{g} \cdot \text{mm}$ が得られる。 $\therefore U = 200\text{g} \cdot \text{mm}$

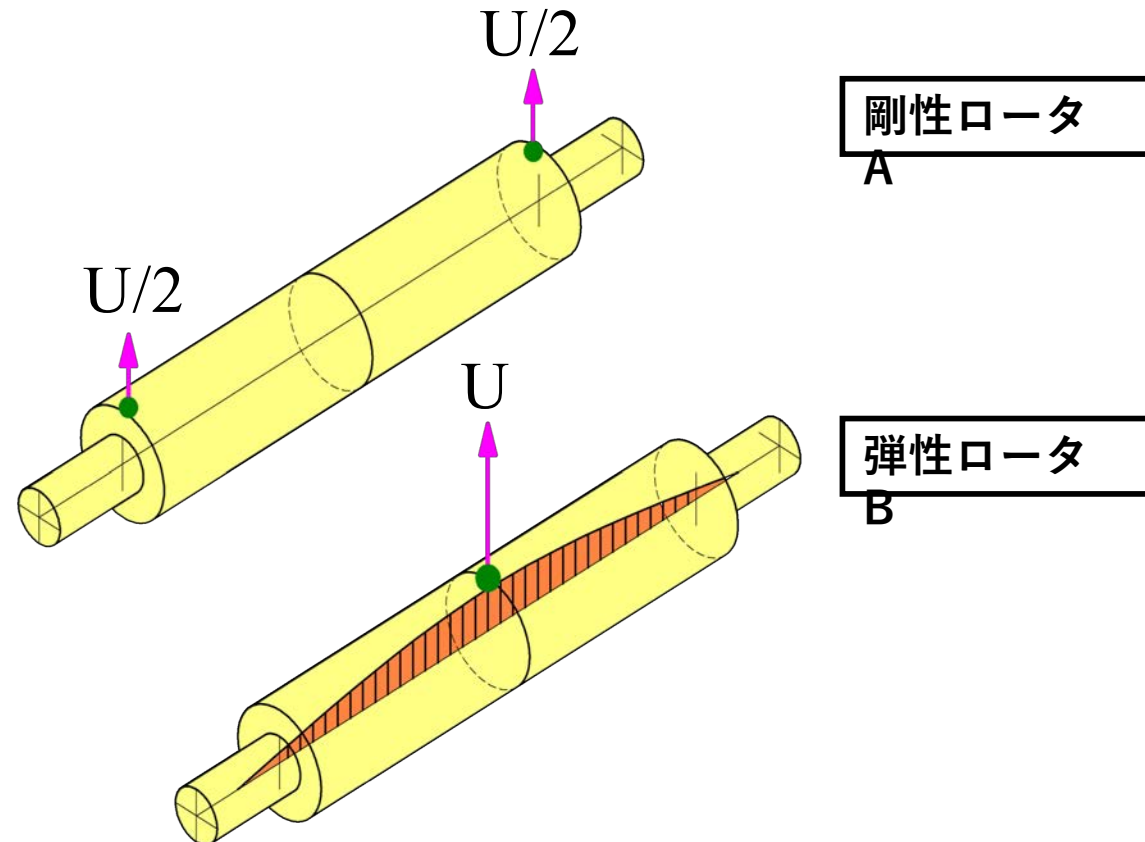
例題 - 2 釣合い良さ等級から「許容不釣合い」 U を求めると

$U = 9.55 \times M \times G \div N$ の式から
 $U = 9.55 \times 10,000\text{g} \times 6.3\text{mm/s} \div 3,000\text{rpm} = 200.55\text{g} \cdot \text{mm}$ となる。

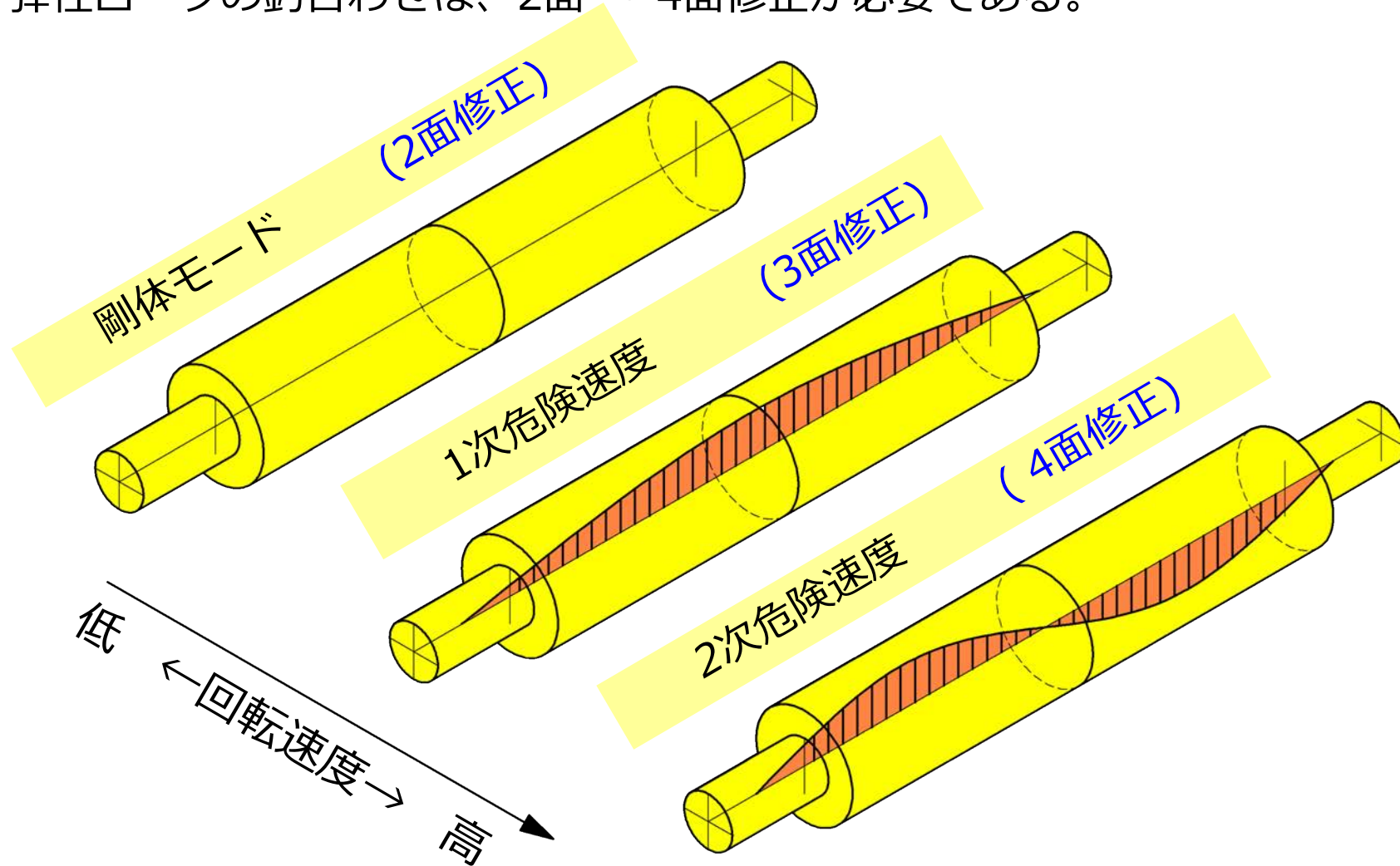
1. 左右対称なロータの場合 : 2個所の修正面に 1/2 ずつ分配
2. 46頁 の例題(200g・mm)の場合, 各面上の許容不釣合いは 100 g・mm
3. 修正半径が 50 mm に於ける、許容値は 2 g
4. 極端に非対称 : 特別な配分が必要
5. 軸受間隔に比べて修正面間隔が狭い : 静 と 偶不釣合いに分割



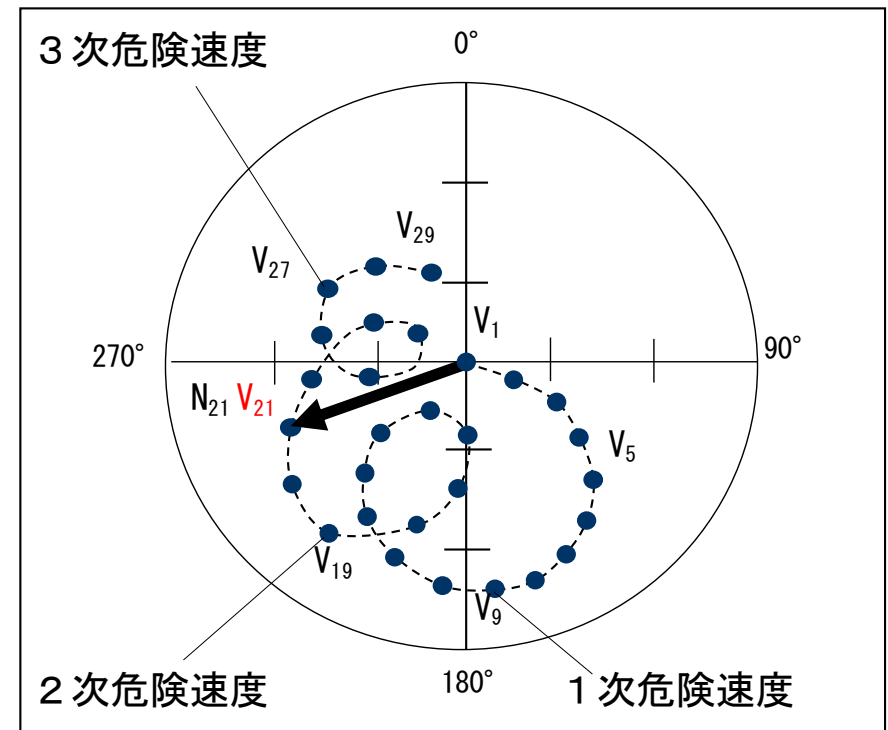
1. 剛性ロータ A は、自分自身の不釣り合い力による変形が、無視できるロータである。
2. 弾性ロータ B は、高速回転になると自分自身の不釣り合い力によって変形するロータである。
3. 危険速度とは、弾性ロータ B の固有振動数と、その回転数が一致した時の回転速度である。



1. 剛性ロータは、**高速回転域**で弾性ロータ化し、**危険速度**を持つようになる。
2. 危険速度を持つ、ロータの釣合わせは、**多速度・多面法**が有効である。
3. 弾性ロータの釣合わせは、2面～4面修正が必要である。



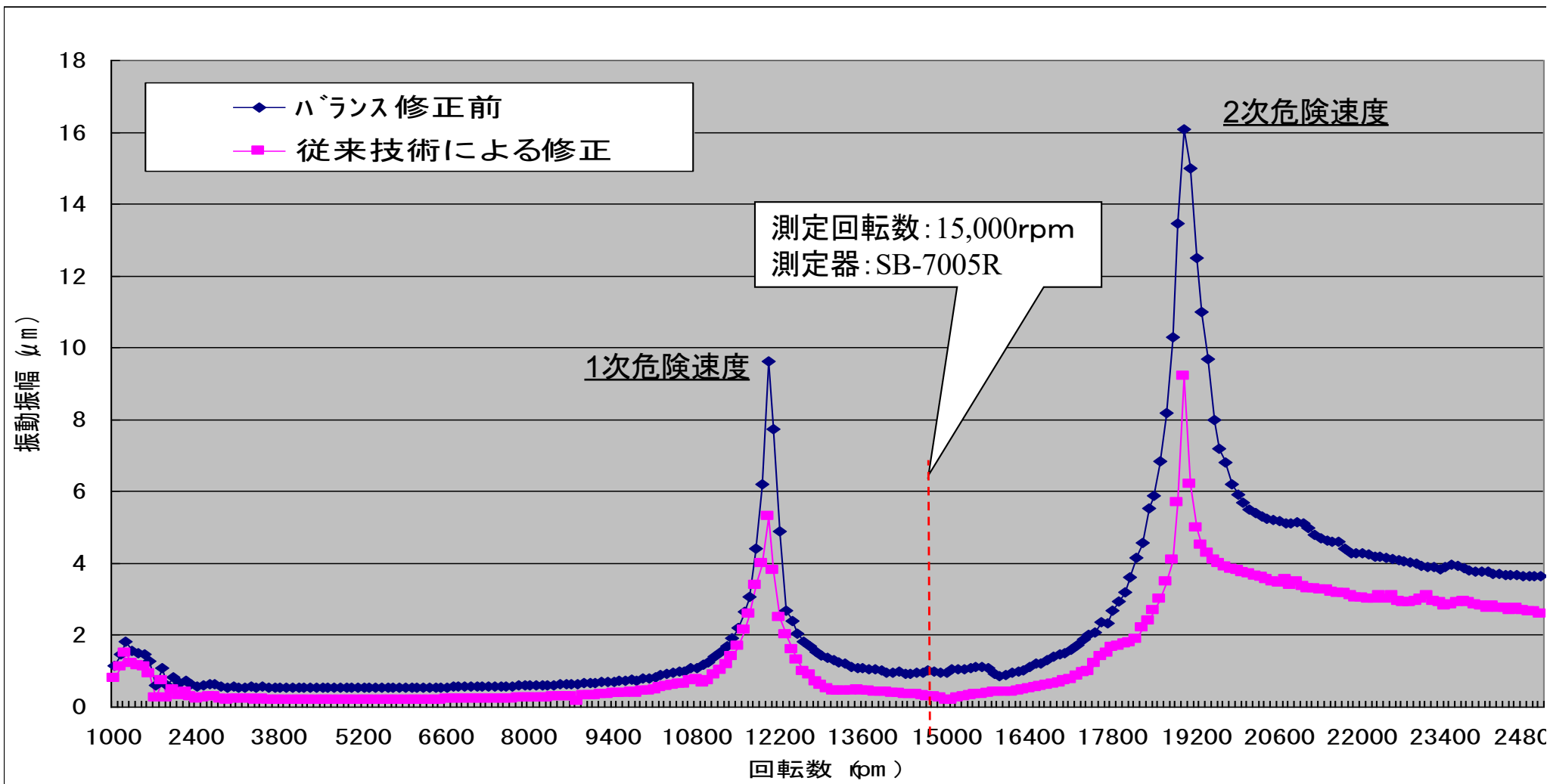
1. 剛性ロータの多面修正釣合わせは、個々の回転速度の振動ベクトルからアンバランス演算をしている。
2. ところが、弾性ロータの振動ベクトルは図のように回転速度により変化する。
3. 図のような、弾性ロータを一つの方法で速度 V_{21} で修正すると、他の速度では振動は残ってしまう。
4. 通常の2面修正釣合わせでは、全回転域の良好な釣合わせは、熟練者が多大な労力をかけていた。



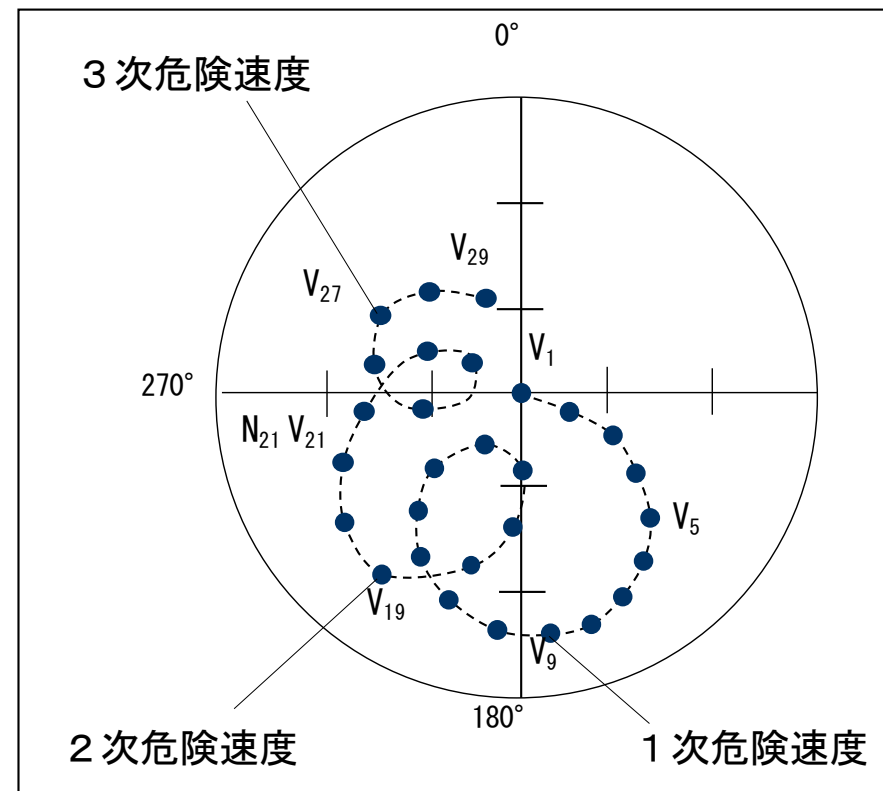
V_n : 回転数 N_n における振動ベクトル

従来の2面修正法の限界

釣合わせを行った、回転数(15,000rpm)の振動は減少しているが、その他の回転域では、**わずかに減少**しただけである。

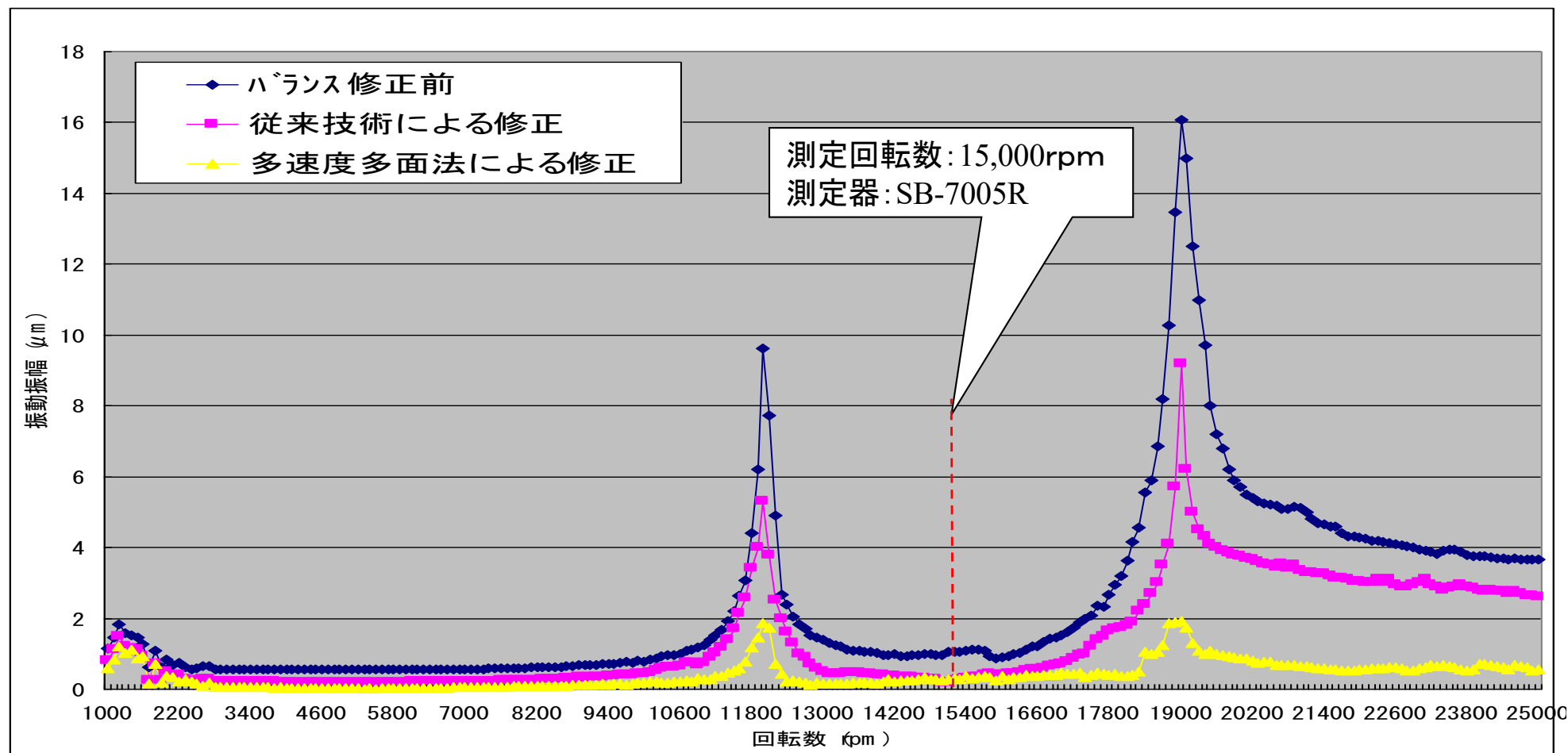


1. ロータを停止状態から**最大回転数まで**上昇させながら、あらかじめ設定した回転間隔で、**初期振動ベクトル**を取得する。
2. 全ての修正面に、**順次試し重りを付加して**行きながら、各面の**付加振動ベクトル**を取得する。
3. 取得した全ての振動ベクトルデータから、**最小二乗法**を利用して、**バランス修正演算**を実施し、**全回転域の振動を低減**させる。
4. また、ロータを最大回転数まで上昇させ、**減速中に振動ベクトル**を取得しても、同様の結果が得られる。
5. 従来技術では、修正面数と振動センサ数の関係は1:1の関係であったが、最小二乗法の採用により無関係とした。すなわち、**1個の振動センサ**でも、**最大4面修正**までの最適な修正演算を可能にした。



不釣り合い振動ベクトル図

主軸の高速回転化・大型化に伴い、その**曲げ剛性は低下し運転領域に危険速度が発生する**に至ったが、**多速度・多面法の採用**で下図の結果が得られた。



振動量一回転数特性図

1. 従来は、ロータを剛体として下図の①修正面Aと④修正面Dの2面間で不釣り合い修正を行っていた。
2. ロータの不釣り合いと、修正面が同じ位置であれば問題ないが、一致していない場合、高速域で弾性変形の原因となる。
3. ビルトインモータの多くは不釣り合いの主原因がモータロータ⑥に存在する。これを主軸両端に代表してバランス修正を行うと、ネジリ振動を誘発させ危険速度を助長させることになる。
4. このため、高速精密主軸はモータロータ②③とスピンドル両端①④の4面修正をすべきである。
5. 実施したある工作機械メーカーでは、生産効率が4倍向上した実績がある。

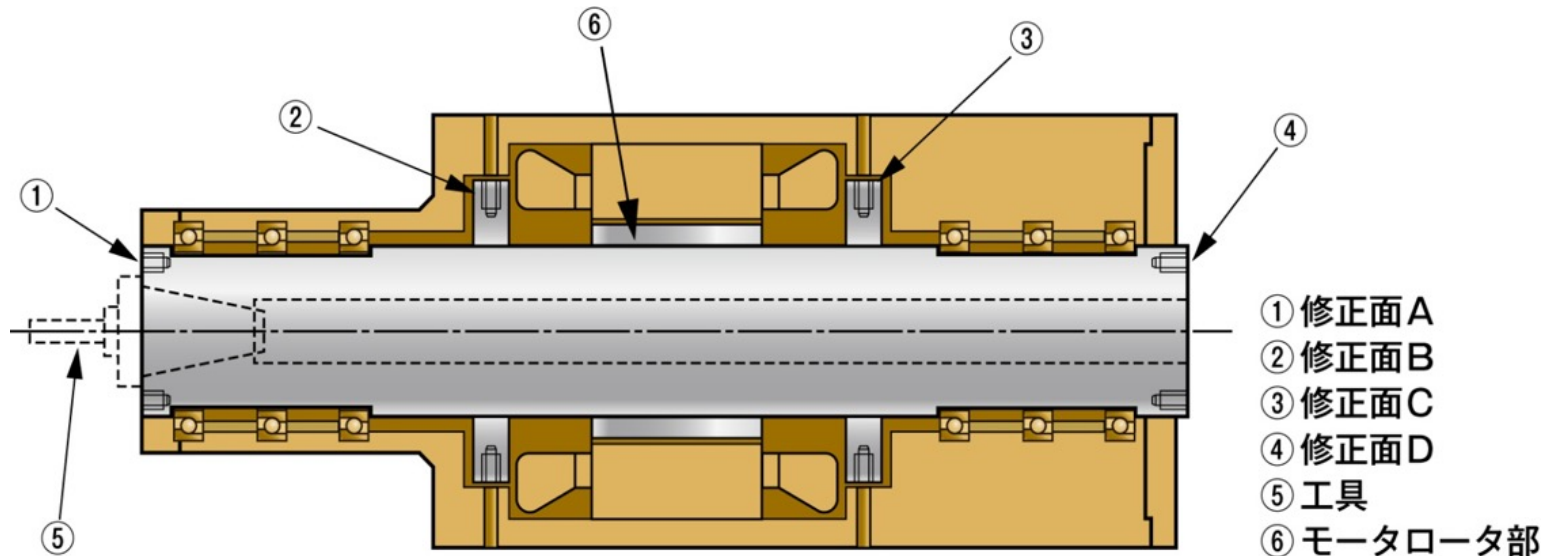
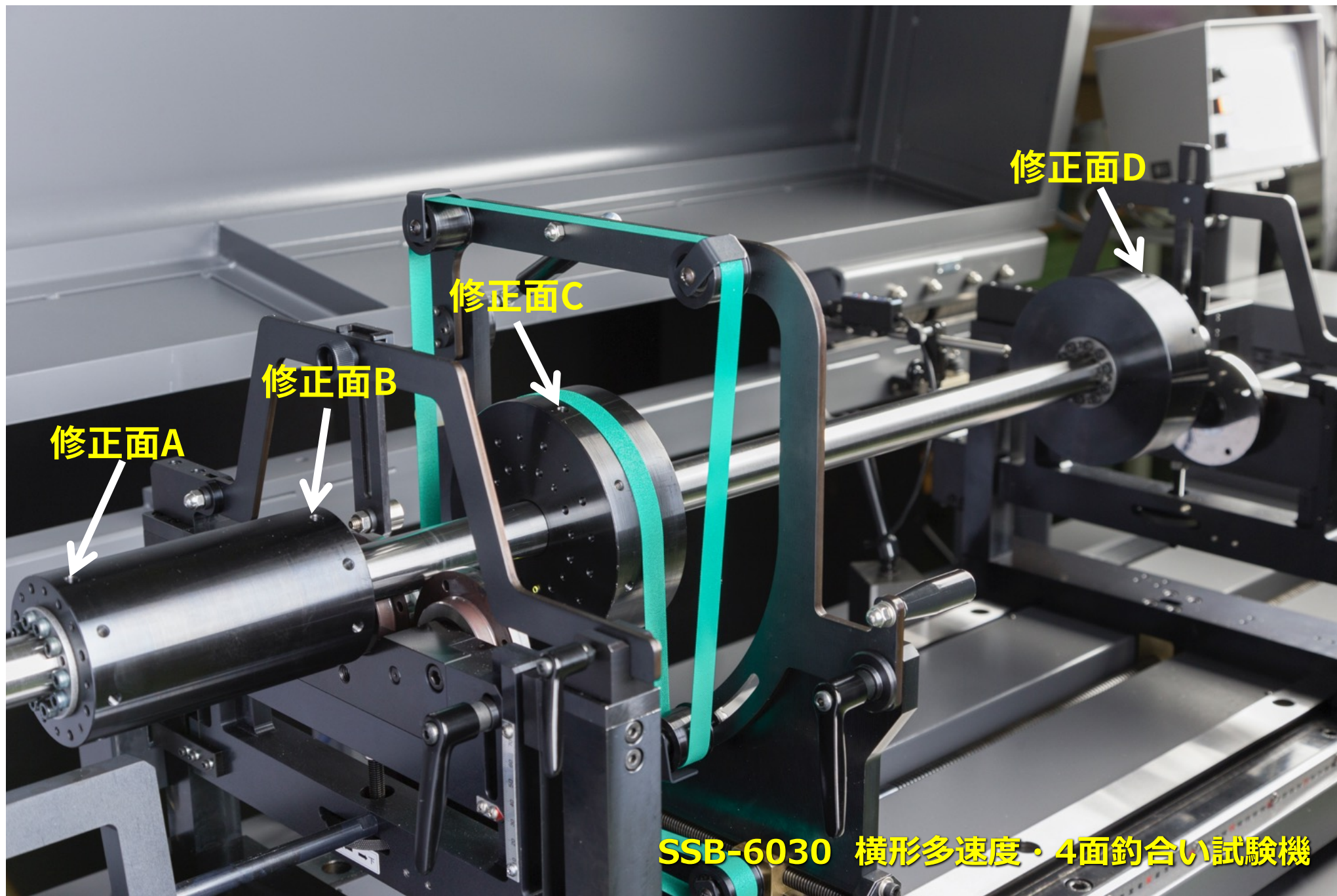
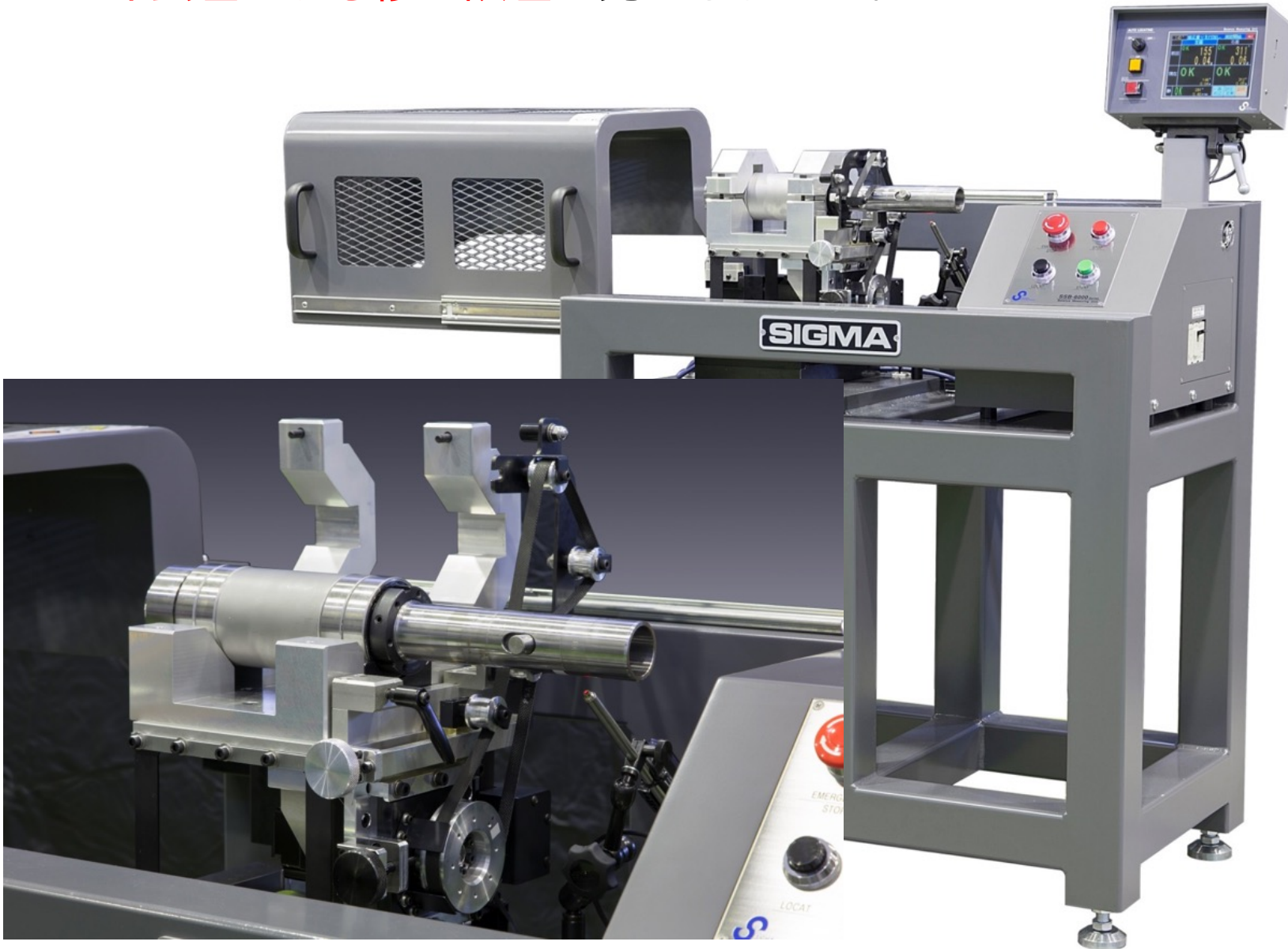


図-7 ビルトインモータの主軸



1. 軸受Assy済みロータを不釣合い修正するので、**軸受のハマア**
イ公差による修正誤差は発生しません。

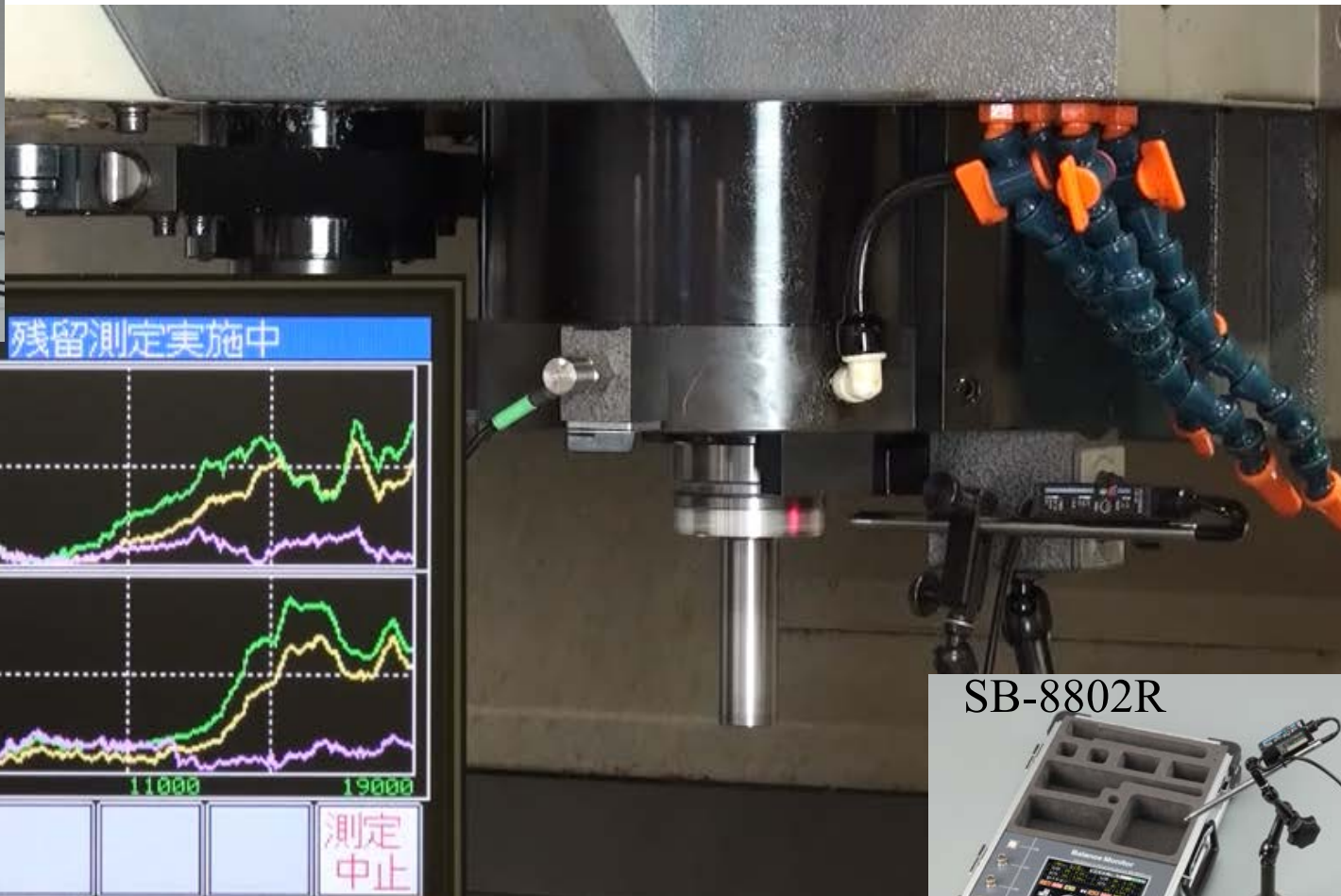


現場釣合わせ：運転状態での釣合わせ

全回転域の釣合わせ : SB-7705R

任意の回転数での釣合わせ : SB-8802R

SB-7705R

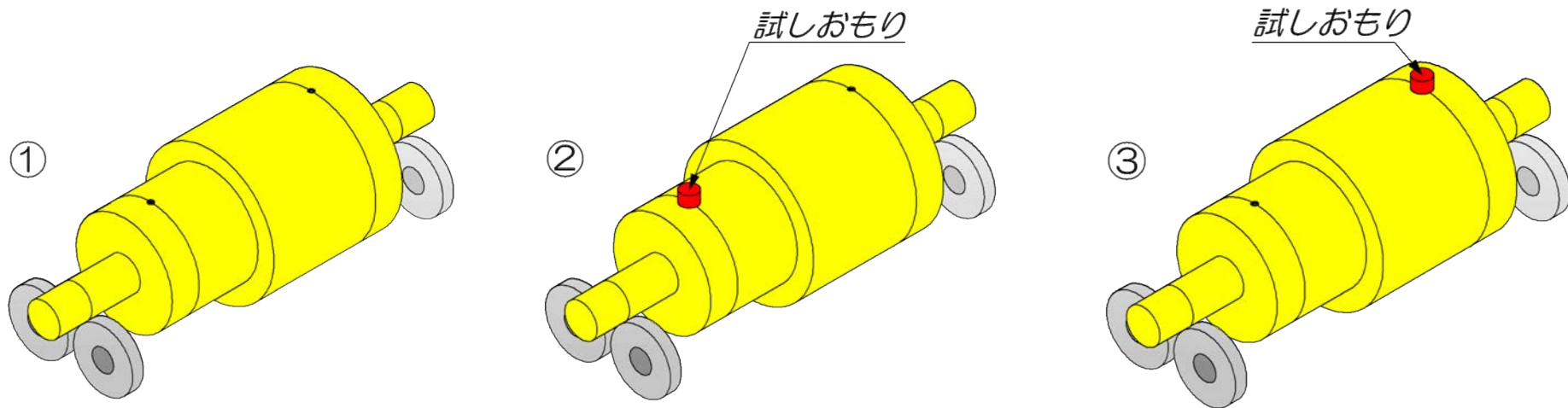


SB-8802R



フィールドバランサ (SB-7705R) の使用例

1. 剛体ロータ ⇒ 任意の回転数の**一定速度**で回転させ、**1～4面**の釣合い修正が可能です。
2. 弾性ロータ ⇒ **低速から高速回転域まで**回転させ、**全運転域**の**1～4面**の釣合い修正が可能です。

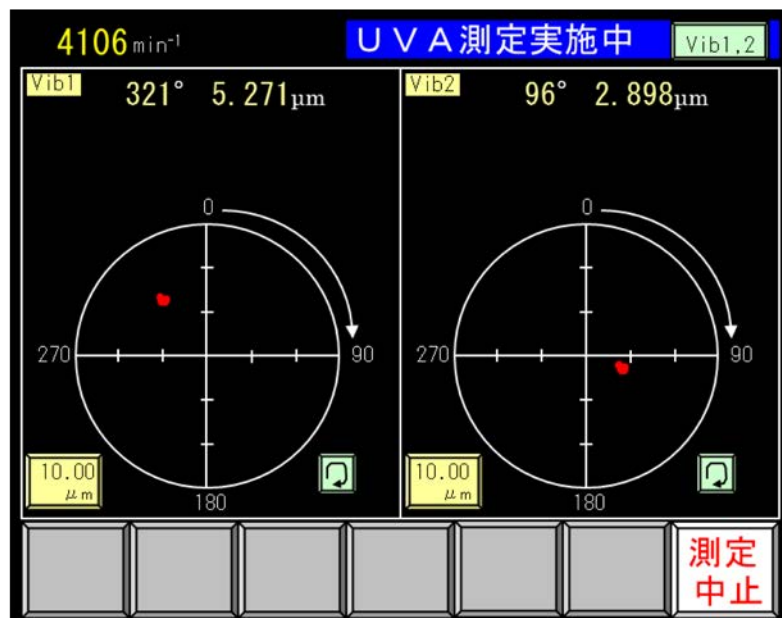


2面修正では、3回の試運転でバランスが可能

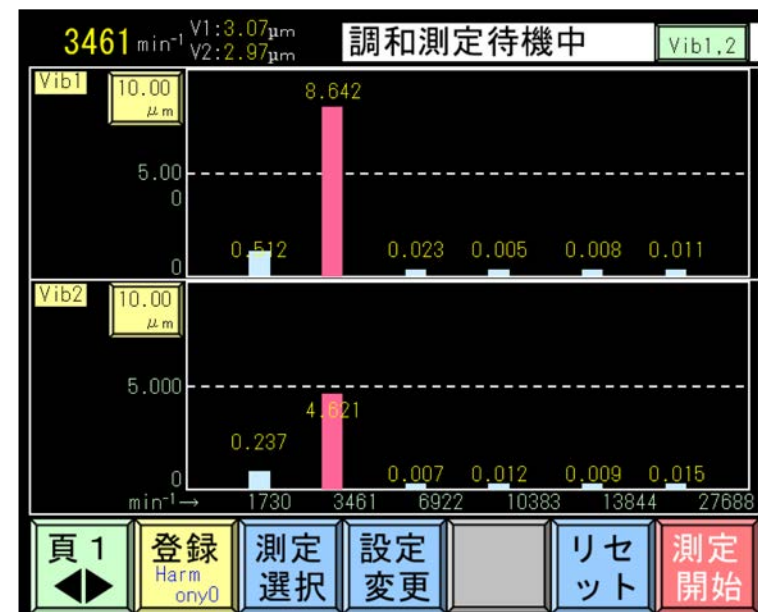
1. 回転ムラのある回転機械に対する注意点

アンバランス振動は、**回転数Nの二乗に比例して変化**し、直接的にバランス修正精度に影響を与えるので、**アンバランス振動分析の機能を利用して事前調査**すべきです。図に示す様に、**プロットされたデータにバラツキ**がなければ、一般的には**バランス修正は可能**です。

2. 回転機械から発生する振動の主成分がアンバランス振動によるものかを調査します。この調査には調和振動分析の機能を利用します。



アンバランス振動分析



調和振動分析

1. センサと信号ケーブルの絶縁抵抗の維持は極めて大切である。
2. 強い衝撃を加えないよう注意、圧電素子が破損する恐れがある。
3. センサの設置位置は、軸受の近くで剛性の高い場所を選ぶ。
4. センサの設置面は平坦な場所を選択、凸凹面に設置すると接触共振により、正確なバランスングが出来なくなる恐れがある。
5. センサの質量(マグネット質量を含む)は、測定対象物の質量の1/5 以下にすべきである。
6. センサケーブルの揺れ対策は充分か。
7. 測定対象物からの漏電対策は充分か。
8. センサケーブルを設置する際に、測定対象物のノイズ源から遠ざけて配線するよう心掛ける。
9. 高温部に接着剤でセンサを固定する際、接着剤の選択に注意が必要。

日本、米国の標準規格(JIS B0905-1992, ANSI)による剛体ロータの釣合い等級G(品質)は、その最高回転速度 ω に応じて、ロータの許容残留不釣合い量U(g-mm)として、**経験的に定められています**。そこで、**試し重り質量 U_t (g-mm)**は、上述のロータの許容不釣合い量U(g-mm)の5倍程度とした**弊社の経験値**を推奨し、以下にその計算例を示します。

- 1) 釣合い等級Gは許容残留比不釣合い e (μm) と最高回転速度 ω の積 ($G=e \times \omega$) となる。
- 2) 許容残留比不釣合い e (μm)は、 e (μm) = U (g-mm) / M (g) であるので、釣合い等級Gは、ロータ質量をM(g)として **$U = 9.55 \times G \times M / \text{rpm}$** となる。
- 3) さらに、ロータの許容不釣合いU は、 $G = 1.0$ 、 $M = 3,000\text{g}$ 、 $\text{rpm} = 30,000$ としたときの計算例は $U = 9.55 \times 3,000\text{g} \times 1.0\text{mm/s} \div 30,000 = 1\text{g-mm}$ となる。
- 4) 試し重り質量 U_t は $U_t = U \times 5 = 1\text{g-mm} \times 5 = 5\text{g-mm}$ となる。 **軸受に不要な機械ストレスを与える事は避けるのが望ましい。**
- 5) ここで、修正半径 = 25mm とすると $U_t \div 25\text{mm} = 5\text{g-mm} \div 25\text{mm} = 0.2\text{g}$ となり、**試し重り質量は0.2g を付加する。**
- 6) 弊社の釣合い試験機、フィールドバランスは、付加測定の結果、初期測定に比較して**振動ベクトルの変化が20%以下の場合**は、エラーを発報して、**試し重りの増量、重りの取付角度の変更を要求する。**

- 1) 剛性ロータのバランスに於ける修正面数の選択は、ロータ長 L と直径 D の比率 L/D とロータの実用最高回転速度から決定される。
- 2) 近年の産業機械は高速・大型化が進み主軸剛性は益々低下して弾性ロータ化してきた。
- 3) 回転数が $\leq 3600\text{rpm}$ で $L/D \leq 0.5$ の主軸のバランスは、一定速法を利用して1面バランスが可能。
- 4) 回転数が $\leq 9000\text{rpm}$ で、 $L/D \leq 2$ の主軸の剛体ロータ領域で、一定速の2面バランスが可能。
- 5) 回転数が $\geq 9000\text{rpm}$ で $L/D \geq 2$ の主軸では徐々に剛体を維持できなくなり、弾性ロータに変身して、一次曲げモードが現れ始める。この条件下では、一定速法ではバランスが不可能となり、多速度・多面法が必要となる。
- 6) 図6は、弊社の経験に基づくものである。

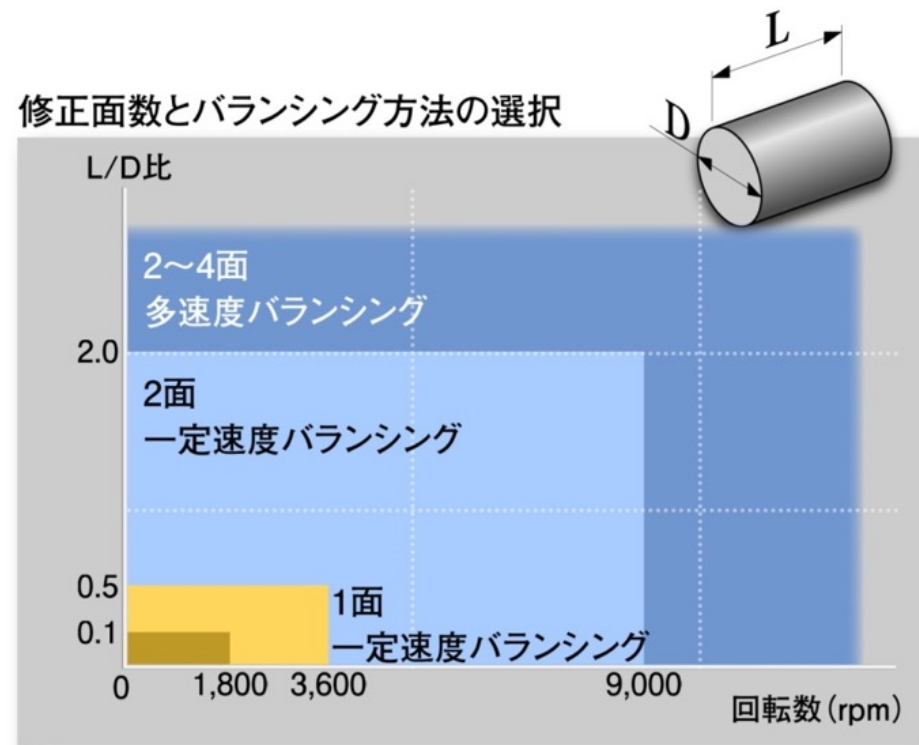


図6 修正面数とバランス方法の選択

- 1) 初期測定でベクトル A_0 ($270^\circ 2\mu\text{m}$) を取得したとする。ここで、位相 270° の意味は、ロータに貼り付けた反射シール端から、振動ベクトルの最大値 $2.0\mu\text{m}$ までの角度を示しているが、振動と回転センサー相互間の設置角度のズレは考慮されていない。
- 2) 振動と回転センサーの取付け角度を図の如く、同一方向に設置して、初期振動ベクトル $A_0=270^\circ 2.0\mu\text{m}$ を取得した。
- 3) この場合、試し重り U を設置する角度 θ_t は $\theta_t = \theta \pm 180^\circ = 270^\circ \pm 180^\circ = 90^\circ$ となる。つまり、反射シール端から 90° 進んだ付近に試し重りを付加すれば、振動は低減する。
- 4) 但し、試し重りの質量については不明です。67頁の、試し重りの選定を参照して下さい。
- 5) ただし、危険速度の前後で振動ベクトルは反転するので注意が必要です。

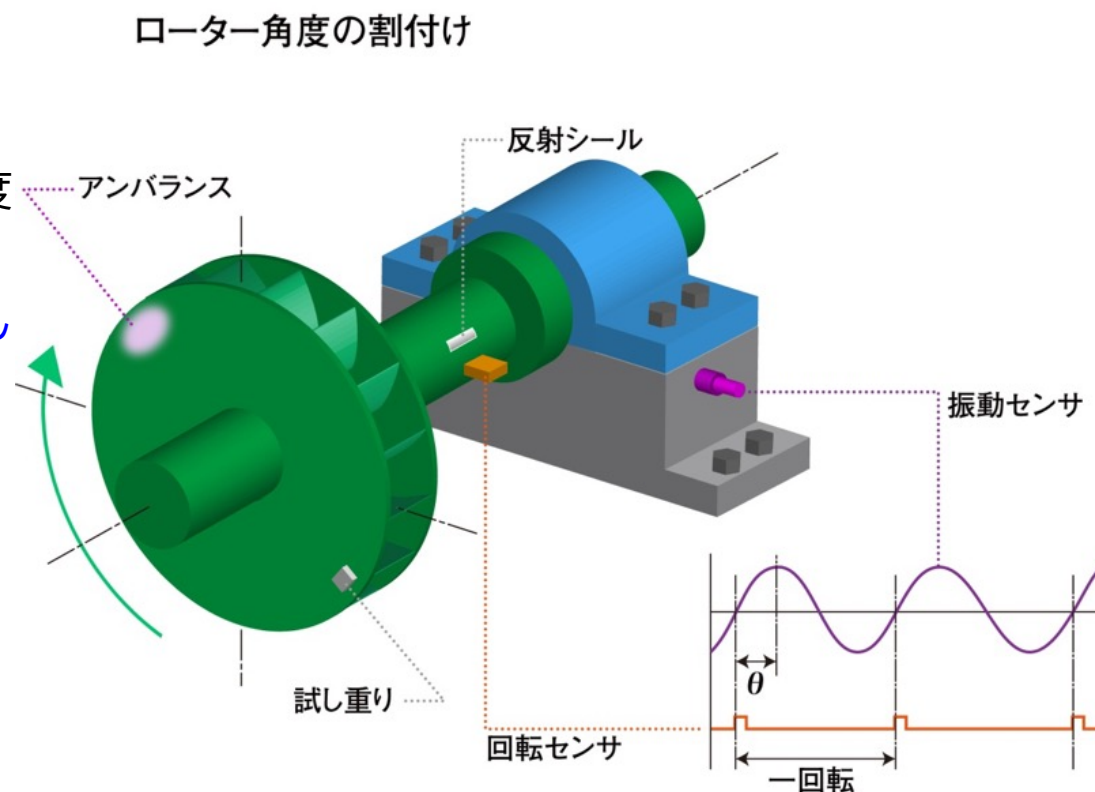
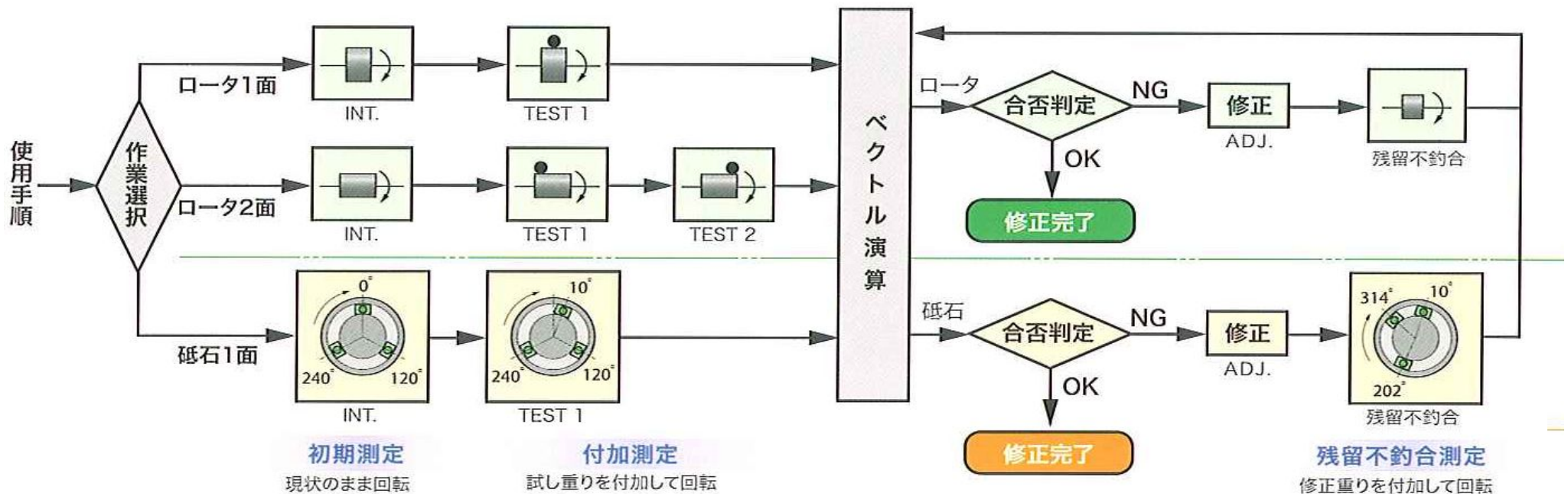
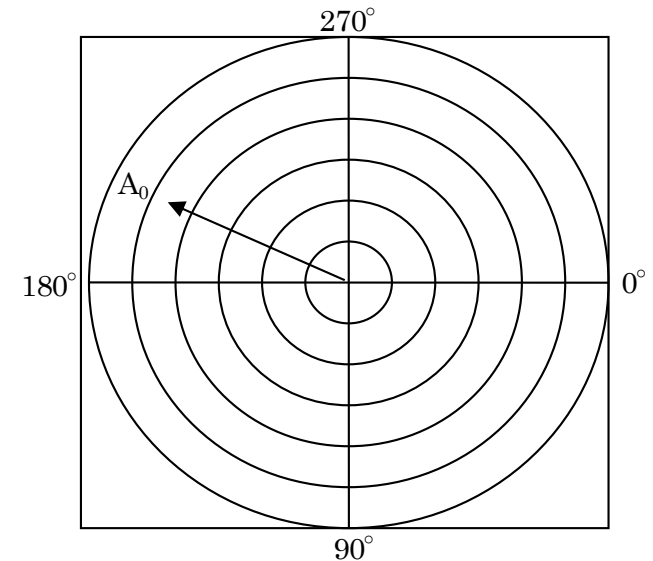


図 送風機のバランスング

1. 初期振動ベクトルの取得

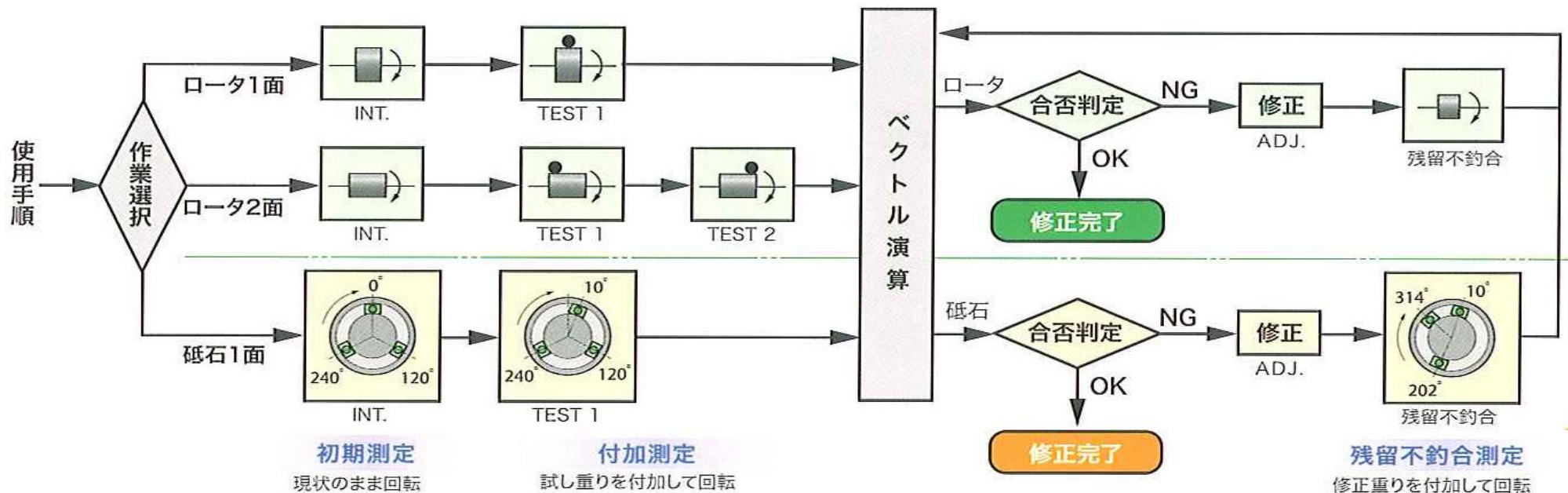
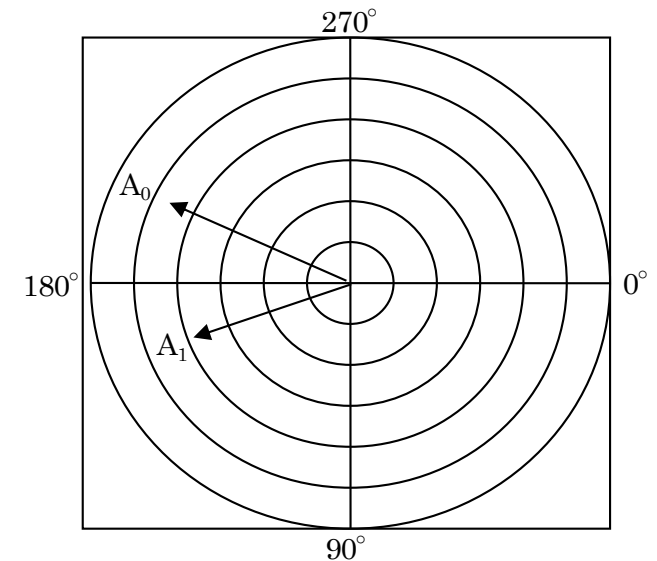
- 1) ロータを回転させ、初期振動ベクトル A_0 ($9.3\mu\text{m}$, 212°)を得たとします。
- 2) ここで、 A_0 は被試験体の構造、据付状態、修正面、各センサの取付け位置などが変わらなければ一定の値を持つベクトル量です。



2. 付加振動ベクトルの取得

1) 回転体の既知の角度に、**試し重り U^* ($0.2g, 0^\circ$)**を付加して、回転させる。

2) このときに得られた振動ベクトルを**付加振動ベクトル A_1** と呼び、 **$A_1 = (7.8\mu m, 161^\circ)$** を得たとします。



3. 影響係数の取得

1) 試し重り U^* を付加したことにより軸受振動に及ぼした影響は、 $(A_1 - A_0) = A_2$

影響係数 α は $\alpha = \frac{(A_1 - A_0)}{U^*} = \frac{A_2}{U^*}$ となります。

2) ここで、ベクトル A_2 は下記の計算式で求めることができます。

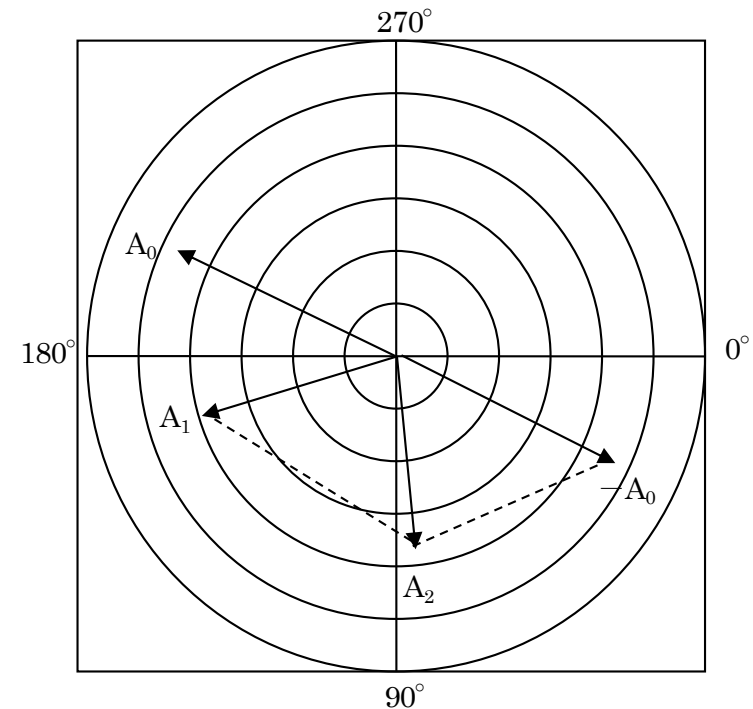
$$\begin{aligned}\alpha_X &= A_1 \times \cos \theta - A_0 \times \cos \theta = 7.8 \times \cos 161^\circ - 9.3 \times \cos 212^\circ \\ &= 0.51\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_Y &= A_1 \times \sin \theta - A_0 \times \sin \theta = 7.8 \times \sin 161^\circ - 9.3 \times \sin 212^\circ \\ &= 7.49\end{aligned}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_Y}{\alpha_X} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{7.49}{0.51} \right) = 86^\circ$$

$$r = \sqrt{\alpha_X^2 + \alpha_Y^2} = \sqrt{(0.51)^2 + (7.49)^2} \doteq 7.5$$

故に A_2 は $7.5 \mu\text{m}$ 、 86° となります。



4. 修正不釣り合い量の算出(極座標修正)

初期振動ベクトル A_0 をゼロとするため、不釣り合い U を取り付けると、次の式が成立します。

$$A_0 + \alpha U = 0$$

したがって、修正する不釣り合い量は次式の通りとなる。

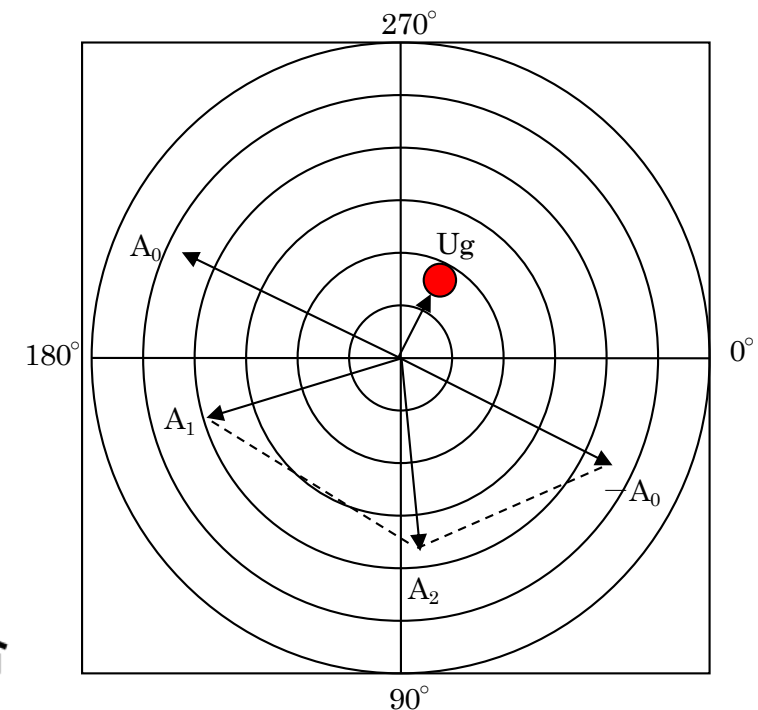
$$U_g = -\frac{A_0}{\alpha} = -\frac{A_0}{A_2} U^*$$

ここで、実測値を代入すると

$$U_g = -\left(\frac{9.3}{7.5}\right) \times 0.2 = 0.25 g$$

$$\angle U_a = -(212^\circ - 86^\circ + 0^\circ) \pm 180^\circ = 306^\circ$$

すなわち、試し重りを付加した角度(0°)から、回転方向に 306° 進んだ角度に修正重り $0.25 g$ を付加すれば釣合う事になる。



1. 固有振動数の計算

1) 振動架台の形状は右図とする。

2) 基本計算式

A) 固有振動数

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k \cdot g}{W}} \quad (\text{Hz})$$

B) バネ定数

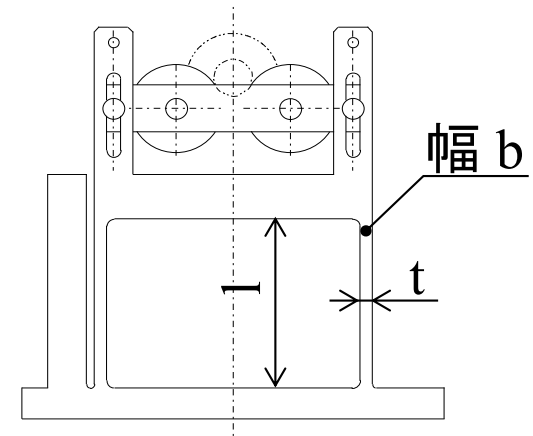
$$k = \frac{12 \cdot E \cdot I}{l^3} \cdot n \quad (\text{kg/mm または kg/cm})$$

C) 断面2次モーメント

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12} \quad (\text{mm}^4 \text{ または cm}^4)$$

D) バネ形状が丸棒の場合
の断面2次モーメント

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (\text{mm}^4 \text{ または cm}^4)$$



$W = W_R + W_0$ W : バネにかかる質量 (kg) W_0 : バネ上質量 (kg) W_R : ロータ質量

E =ヤング係数 2.1×10^4 (kg/mm²) 又は 2.1×10^6 (kg/cm²)

g : 重力の加速度 9800 (mm/s²) 又は 980 (cm/s²)

l : バネの有効長さ (mm)

b : バネの幅 (mm)

t : バネの厚み (mm) D : 丸棒の場合 (mm)

n : バネの枚数 片側の振動架台で2枚 左右の振動架台で4枚となる。

回転体の釣合わせ：番外編

1. オイルホワール
2. オイルホイップ
3. 回転軸の中にある摩擦
4. シールによる振動
5. すきまのある転がり軸受
6. 断面が非対称な回転体
7. 非対称な物体が取り付けられた回転体
8. 修正面間隔が狭いロータ
9. 溶接修正
10. バランス工程の前処理
11. 重力による変形
12. ミスアラインメント
13. 接触して回転するものがある
14. ごく僅かに回転速度が異なる複数のロータがある