

「高速スピンドルの 新たなバランス修正法」



シグマ電子工業株式会社

目次

1. はじめに	1
2. ロータの分類	2
3. 高速回転域に於いて, 剛性ロータは弾性ロータに変身する	3
4. 弾性ロータの危険速度と, その弊害	4
5. 従来 of バランス修正法	5
6. 一定速バラシングの問題と限界	6
7. 多速度・多面法の開発	7
7-1 開発に至る背景	7
7-2 多速度・多面法	8
8. 速度・多面法の導入効果	9
9. 高速スピンドルのバランス修正の課題	10
10. 3次元の振動を抑える, 新たなバランス修正法	11
11. 非接触変位センサを利用した, 超精密なバラシング法	12
12. 多速度・多面法を応用した釣合試験機	13
13. 自動車用ターボチャージャのバラシンク	14
13-1 従来からのバランス修正方式	14
13-2 多速度法を導入したバラシング法	15
13-3 多速度・多面法の導入効果	16
13-4 許容値の約7倍のサンプル	17
13-5 許容値の約18倍のサンプル	18
13-6 多速度プリバランス修正の必要性	19

13-7 多速度プリバランス修正の効果	19
13-8 ターボチャージャの多速度・多面バルンサー	20
1) タービンシャフト専用	
2) ターボASSY品専用	

1. はじめに

本開発のきっかけは、某繊維メーカーから『繊維巻取り装置の全運転域の振動を抑える、釣合い試験機(バランス)を開発できないか』と相談されたことに始まる。なお、本装置は写真-1のように軸受が片持構造の高速回転機械であった。

従来の釣合わせ法は、一定速法のため、全運転域の振動を抑えるには、熟練した技能と長時間の作業を要し1台の釣合わせに4時間程度を費やしていた。

このような背景から、弊社は新たなバランスング法である、多速度・多面法の開発に取り組むことにした。

以前から本技術の基礎研究は進めていたものの、商品化までに約2年半の歳月を費やした。繊維機械・工作機械メーカーにプロトタイプを持ち込み実験を繰り返し、またJIMTOF等の展示会では、様々な産業界の方々のご意見を伺った。

2002年2月、多速度・多面法を導入した、業界初のフィールドバランスの商品化に成功した。その結果、全運転域の振動を、従来技術の1/5以下に低減させ、さらにバランスング時間を1/8以下に短縮させた。

以下に、多速度・多面法の有効性、応用事例について述べる。



写真-1 繊維巻取り装置(ワインダ)
(Max 30,000rpm)

2. ロータの分類

JIS B0153では、剛性ロータ、弾性ロータを次のように定義しています。

剛性ロータ

2つの修正面で釣合させた結果、実用最高回転速度以下の、いずれの回転速度でも、ロータの変形によって、不釣合い量が許容値を超えないロータ。

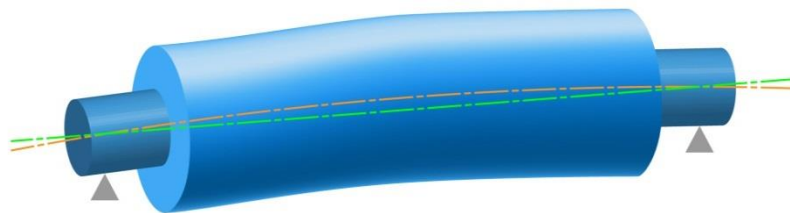
弾性ロータ

剛性ロータでないロータが弾性ロータ。つまり、回転速度の変化があるとロータの変形によって不釣合い量が変わるロータ。

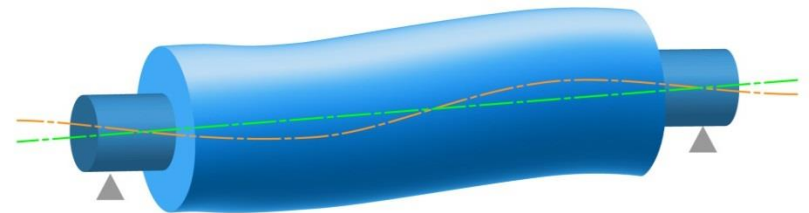
問題点 : 従来の一定速バランス法では、弾性ロータの良好な釣合わせは困難である。

3. 高速回転域において、剛性ロータは弾性ロータに変身する。

1. 従来技術の一定速法により釣合させた剛性ロータを高速回転させると、ロータ内部に残留していたアンバランス(U)が遠心力を作用させ、図-1のようにロータは曲げモード(変形)を発生させる。
2. 実用上この曲げが無視できるロータを剛性ロータと云い、無視できないロータが弾性ロータである。
3. つまり、同じロータでも回転速度が低い状態では剛性ロータであるが、回転速度が高くなると弾性ロータに変身する。
4. 転がり・空気・磁気等の軸受はいずれも弾性体であり、前述の曲げモードの発生に大きな関係がある。とくに転がり軸受けは注意する必要がある。



曲げ1次モードの回転体
(3箇所の修正面が必要)



曲げ2次モードの回転体
(4箇所の修正面が必要)

図-1 曲げモードの形態

4. 弾性ロータの危険速度と、その弊害

1. 弾性ロータの危険速度とは、ロータの固有振動数の回転速度を表し、危険速度近傍ではふれまわりが起こり、振幅はピーク値を示します。
2. 危険速度における回転軸の変形は、固有振動モードの形とほとんど同じになります。図-2に1次～2次曲げモードの発生の様子を表します。
3. 回転機械は多数の部品から構成されています。例えば転がり軸受では、外輪、内輪、転動体、保持器、軸受ハウジングなどが組合わさされていて、効率良く回転するように設計・製作されています。これらの部品は、いずれも弾性体であり、機械全体の固有振動数に影響します。
4. 弾性ロータに変身したロータは、さまざまな問題を起こします。たとえば、破損、機械寿命の低下、騒音、工作機械においては加工精度の低下などです。
5. これら有害な機械振動を抑えるための釣合わせ技術は、きわめて重要であり、回転機械の製造工程に欠かせないものです。



1次曲げモード(3面修正が必要)



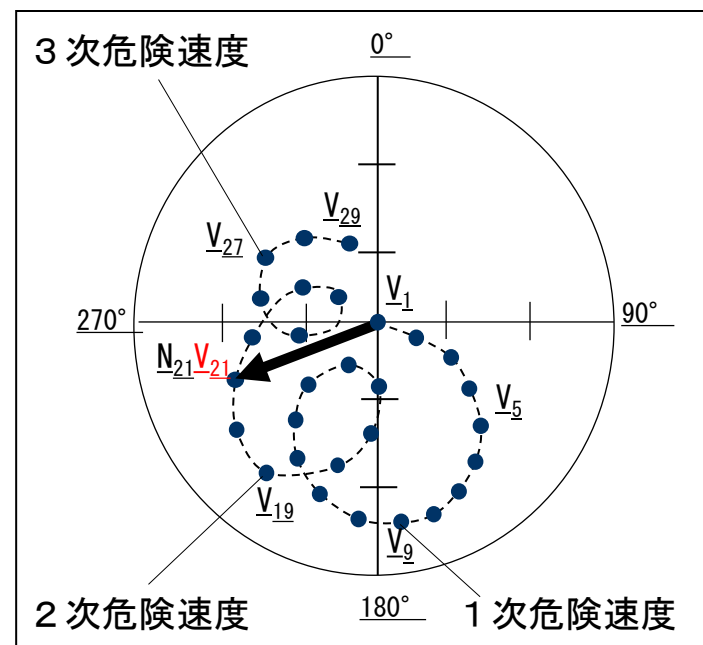
2次曲げモード(4面修正が必要)

図-2 弾性ロータの曲げ振動モード

5. 従来のバランス修正法

剛性ロータとして、一定速バランスを行っていた。

1. 従来は、ロータを任意の回転数で定常回転させ振動ベクトル(V_{21})を取得して影響係数を求め、バランス修正を実施していました。
2. しかし、弾性ロータに変身したロータの振動ベクトルは、図-3に示す様に測定回転数により、その振動ベクトルは大きく変化します。
3. この状態の弾性ロータを、一定速バランス法で修正すると、基本的には V_{21} 以外の振動ベクトルは残ってしまいます。
4. したがって、従来技術の一定速バランス法では、全回転域の良好な釣合わせは不可能であるため、全回転域の良好なバランスが可能で、新たなバランス法の開発が望まれていました。



V_n : 回転数 N_n における振動ベクトル

図-3 不釣合い振動ベクトル

6. 一定速バラシングの問題と限界

修正を実施した回転数以外の領域では、不釣り合い振動が残ってしまいます。

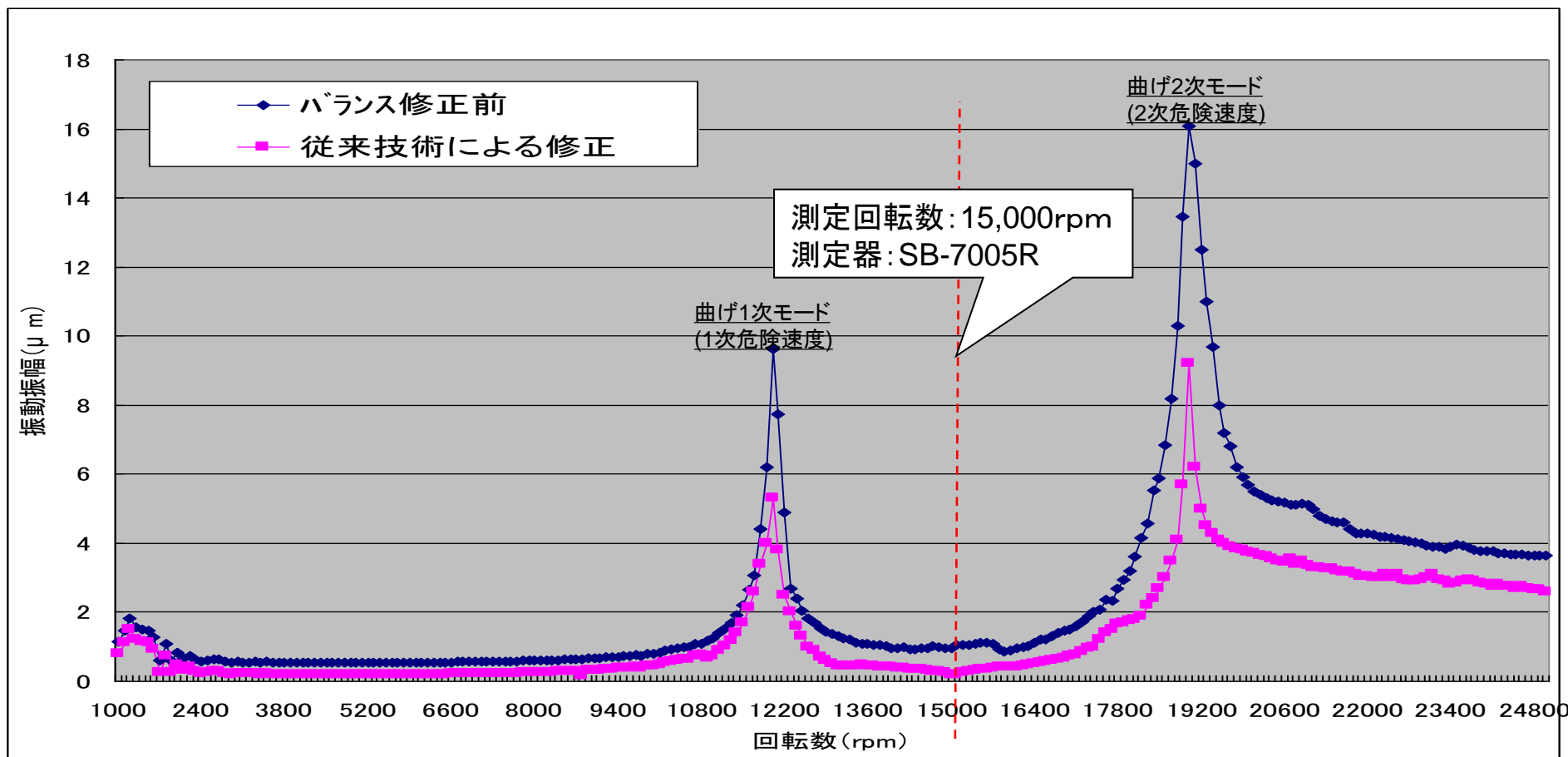


図-4 振動量一回転数特性

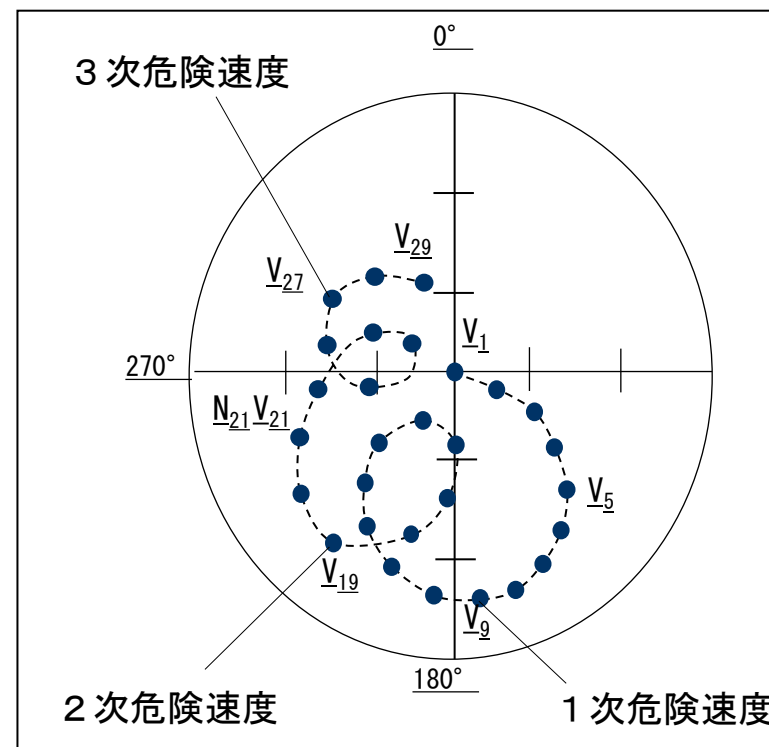
7. 多速度・多面法の開発

7-1 開発に至る背景

1. 回転機械の高速化・大型化にともなって、その曲げ剛性は相対的に低下し、運転領域に危険速度を持つことが多くなりました。
2. 図-4は、ある工作機械メーカーの主軸を測定し、その結果を振動量-回転数特性のグラフ化したものです。ロータの回転数が上昇するにつれて、ロータの不釣り合い遠心力によってロータが徐々に弾性変形を始め、1次の危険速度に達したとき振れまわり振幅は最大となります。さらに回転数を上げると、2次の危険速度が現れてきます。
3. また図-4には、従来技術の一定速釣り合わせによる釣り合わせた結果も記載しています。これによる釣り合わせを実施した15,000rpmの結果は良好ですが、その他の回転領域では十分な釣り合わせ結果が得られておらず、1次、2次の危険速度付の振動ほとんど低減していません。
4. 図-4の不釣り合いを従来技術で低減させるには、最適な修正面の選択と、試験回転数を試行錯誤の中で最適化した釣り合い条件を探索するか、極めて非効率な手法であるステージバランス法を採用することになる。
5. このような背景から、熟練と経験を必要とせず、簡単な操作で、誰でも容易に釣り合わせ作業ができる手法と機器の開発が望まれていました。

7-2 多速度・多面法

1. ロータを停止状態から最大回転数まで上させながら，設定された回転数間隔で，振動ベクトルを自動取得します。
2. 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することにより全回転域の振動を低減させます。
3. 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ます。
4. 従来技術では，修正面数と振動センサ数の関係は1:1の関係でしたが，最小二乗法の採用により無関係とすることができました。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としました。

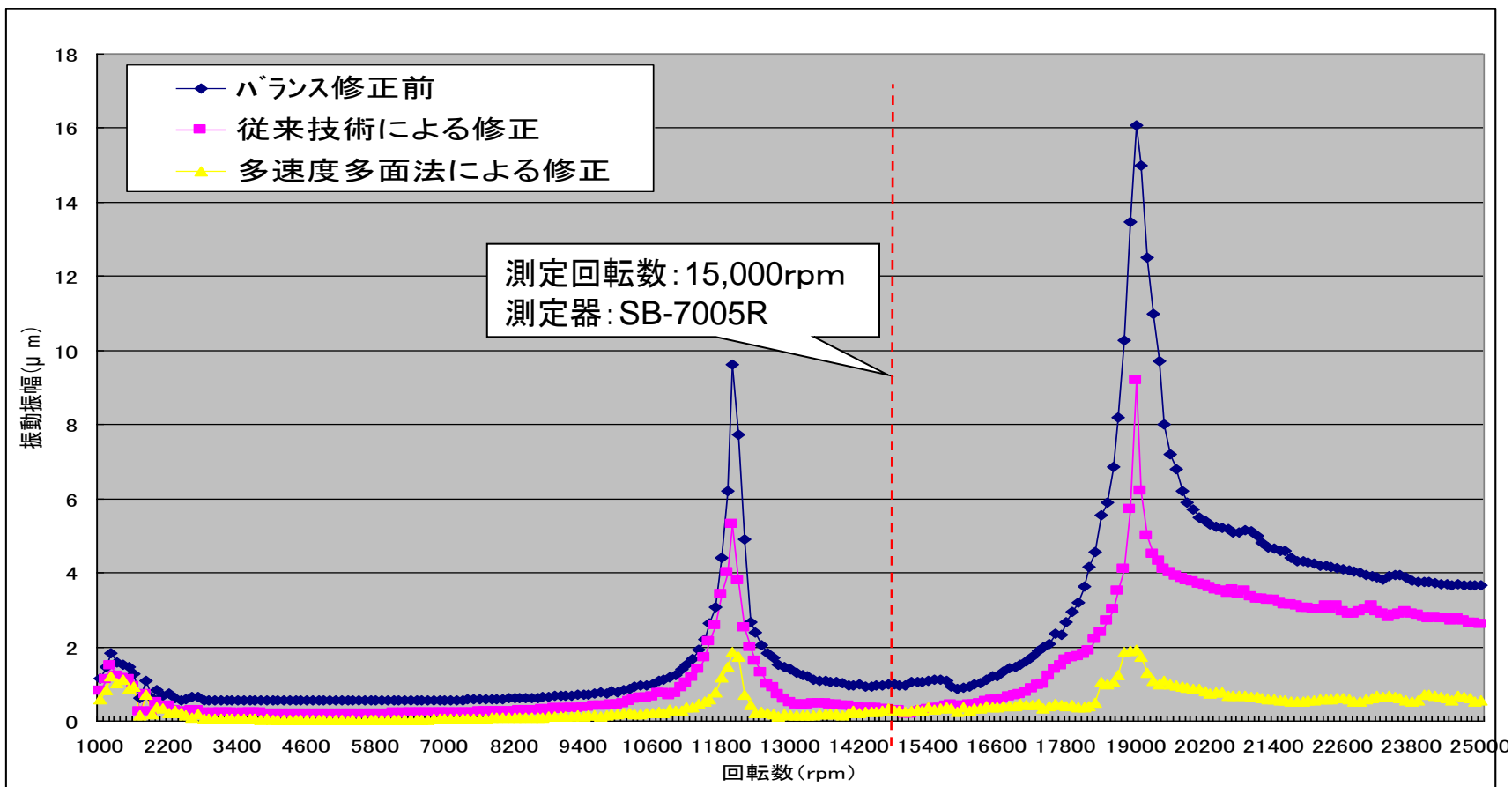


V_n : 回転数 N_n における振動ベクトル

図-5 不釣り合い振動ベクトル

8. 多速度・多面法の導入効果

主軸は高速回転化・大型化に伴い、その曲げ剛性は低下し運転領域に曲げ振動モードが発生するに至ったが、多速度・多面法は図-6の如く、問題を解決した。



9. 高速スピンドルのバランス修正の課題

1. 従来は、ロータを剛体として、図-7の①修正面Aと④修正面Bの2面で不釣り合い修正を行っていました。
2. ロータの不釣り合いと修正不釣り合いが同じ軸方向位置であれば問題ありませんが、違う位置の場合にもなって弾性変形の原因となります。
3. ビルトインモータの場合は、不釣り合いの主原因がモータロータ⑥に存在するため、主軸の両端でバランス修正を行うと、曲げ振動を誘発することになります。
4. したがって、精密な主軸はモータロータ②③とスピンドルの両端①④で4面修正をすべきです。
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とのことでした。

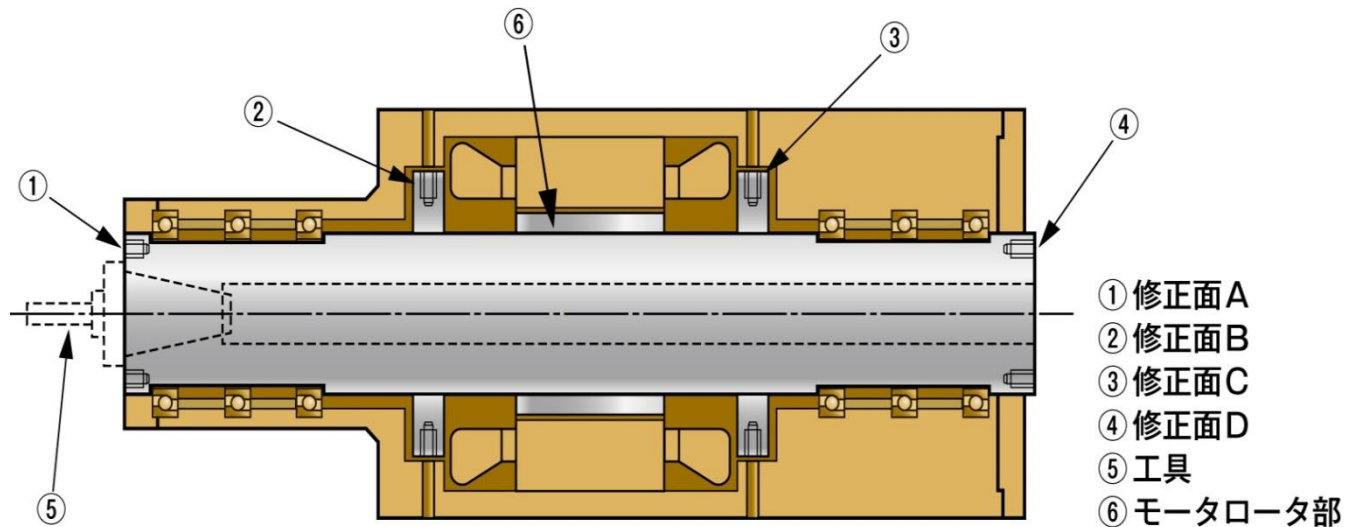


図-7 ビルトインモータの主軸

10 3次元の振動を抑える, 新たなバランス修正方法

超精密主軸として製造された機械であっても, 全ての回転領域に於いて, 主軸剛性を維持することは困難です。

1. 図-8は, ある工作機械の振動を, 回転軸と直交するX-Y平面において計測し, リサージュ波形として記録したものです。これによると, 回転数が変わると, 振動ベクトル(大きさ, 方向)が大きく変化していることが分かります。
2. 新たな不釣合い修正方法は, X-Y平面×2+Z平面の計5平面に振動センサーを設置し, 多速度・多面法により振動を取得演算して, 3次元のアンバランス振動を抑える手法があります。
3. この手法は, XYの2平面の振動ベクトルは等しく且つ, 限りなく小さくできるため, 工作機械の加工精度を飛躍的に向上させます。
4. Z平面の振動センサーは, XY平面に直行しない振動成分を検知して, Z平面の振動を抑える役目をしています。
5. 上記の手法を適用した結果, 釣合わせ作業効率を, 従来方式と比較して約4倍改善した例があります。

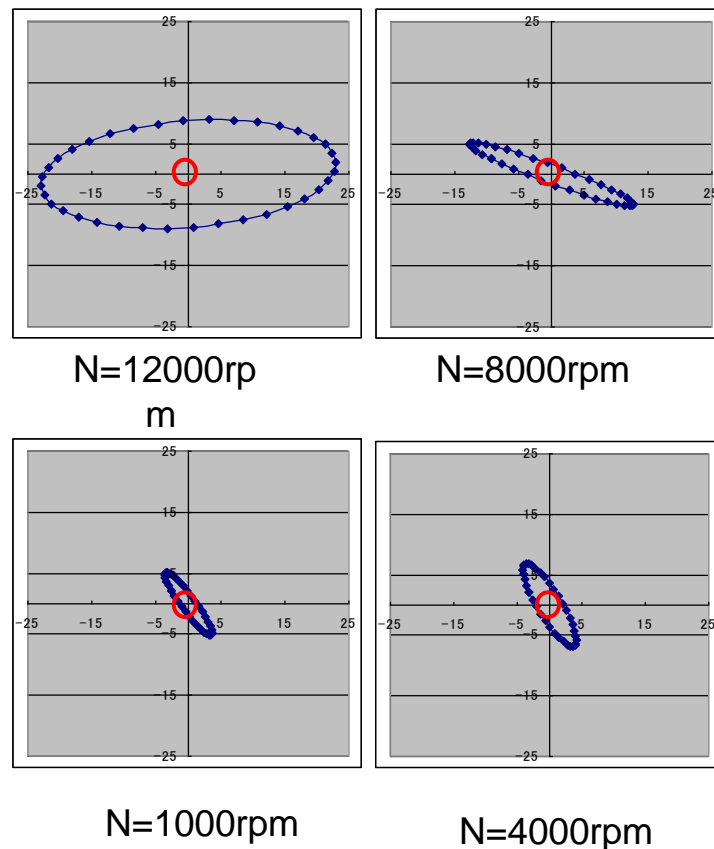
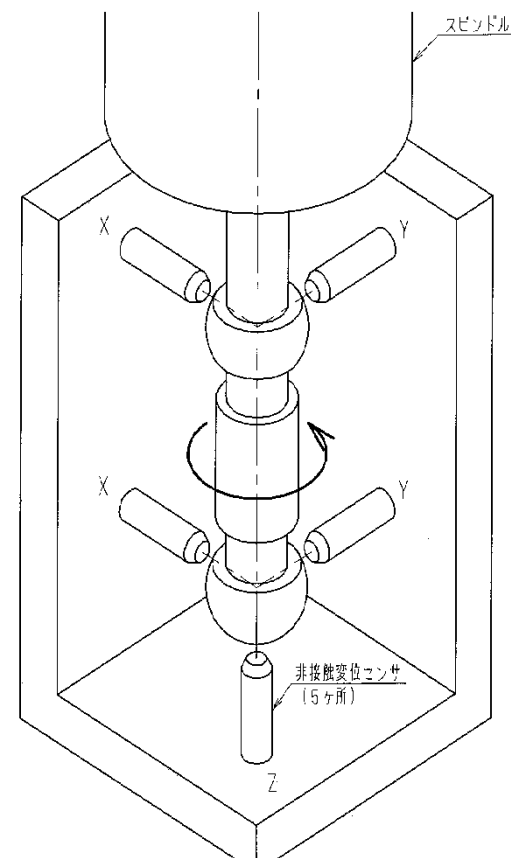


図-8 回転数によるリサージュ波形の変化

11. 非接触変位センサを利用した，超精密なバランスング法

1. 右図に，非接触変位センサを2箇所のXY平面とZ方向の計5方向に設置した不釣合い振動の計測例を示しています。
2. この計測方式は，全ての回転領域に於ける，5方向の不釣合い情報を，多速度・多面法により取得演算し，その全ての軸芯軌跡が真円になるように釣合い修正演算をするものです。
3. 右図の実施例は，弊社フィールドバランス（SB-7702）と市販の非接触微小変位計を使用しています。
4. この方法によると，すべての軸芯軌跡が真円になるように不釣合いを修正するので，加工精度が飛躍的に向上します。但し，この方式は主軸の回転中心軸を質量中心軸に合わせて，不釣合い修正するため，空気軸受・磁気軸受においては効果を発揮します，転がり軸受では限定的と考えます。



図一9 非接触センサによるバランスング

12. 多速度・多面法を応用した釣合試験機

従来から、多面釣合わせを必要とする回転機械は、ステージバランス法という極めて非効率な方法を行ってきました。多速度・多面法の開発は、従来の短所を補い効率的な多面バランスングを実現させました。次にその応用例を示します。

1. 工作機械向け、ビルトインモータ主軸の全運転域の釣合わせを目的とした横形4面釣合試験機。本方式の採用より、従来の汎用横形釣合試験機による釣合わせ作業を省くことができ、大幅な作業効率向上につながりました。(Max 20,000~30,000rpm)
2. 磁気軸受を使用しているターボ分子ポンプの、全運転域の釣合わせを目的とした、立形3面釣合試験機。釣合わせ方式は、内蔵の非接触変位センサーを利用して、全運転域の不釣合い情報を多速度・多面法により取得し、その軸芯軌跡が真円になるように釣合い修正演算するものです。(Max 30,000rpm)
3. エアタービン駆動の空気静圧主軸の全運転域の多面釣合わせ。
4. 自動車用ターボチャージャーの部品単体バランスングを省いて、組立品の不釣合い測定と修正を機上同一段取りで実行するものです。全自動の横形2面釣合試験機(Max 240,000rpm)

13. 自動車用ターボチャージャのバランスシグ

13-1 従来からのバランス修正方式

A. タービンシャフトの単体修正
 修正回転数：横形釣合試験機 2500~3500min⁻¹
 修正方式：一定速バランスシグにて2面修正
 許容値： $e \leq 1 \mu m$

B. コンプレッサの単体修正
 修正回転数：立形釣合試験機 2500~5000min⁻¹
 修正方式：一定速バランスシグにて2面修正
 許容値： $e \leq 1 \mu m$

C. タービンハウジングに組み付けて修正
 使用最高回転速度まで10~30secかけて振動を計測し
 60,000 min⁻¹以下の領域⇒0.75G以下
 60,000 ~120,000min⁻¹の領域⇒1.5G 以下
 であれば合格とする。不合格の場合は最高回転数の一定速にて、コンプレッサ側ナット部で1面バランス修正を実施する。

D. バランス修正完了

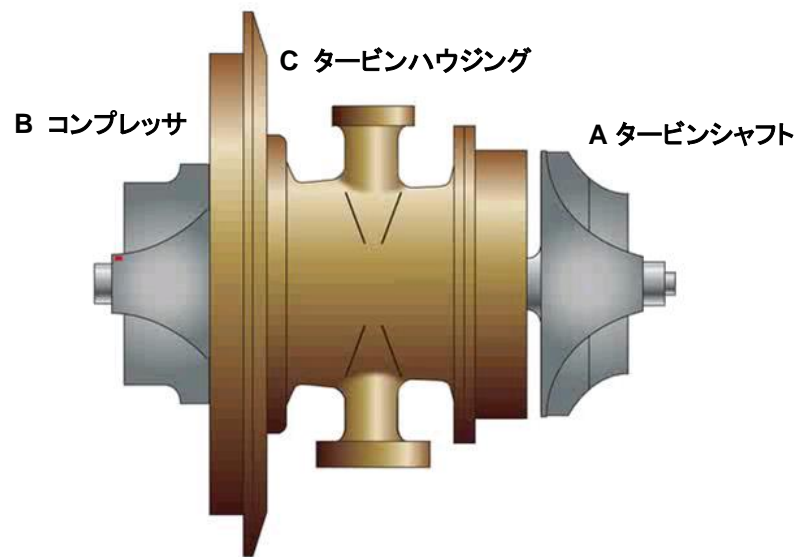


図-10 ターボチャージャ ASSY品

参考文献：ターボチャージャの性能と設計(グランプリ出版)

13-2 多速度法を導入したバラシング

部品の単体バランス工程を省いて、図-12に示すASSY品のバランス測定と修正を機上同一段取りで実行する。以下にプリバランス法の概要を説明する。

1) プリバランス

振動しきい値を設け、回転体の加速中に振動量を、常時監視し、その振動量がしきい値を超えたなら、回転体の加速を停止させ、減速中に多速度バランス演算を行い、自動バランス修正を実施する。これを通常1~2回繰り返し、軸受けの破損を避け最高回転数までロータ回転を上昇させ、全回転領域の振動情報を取得する。

2) 精密バラシング

1)項のプリバランスで取得した、低速から最高回転数(24万 min^{-1})までの全域にわたる3次元振動(X-Y-Z)から、修正演算して全回転領域の振動を0.5G以下まで低減させる。

バランス修正完了

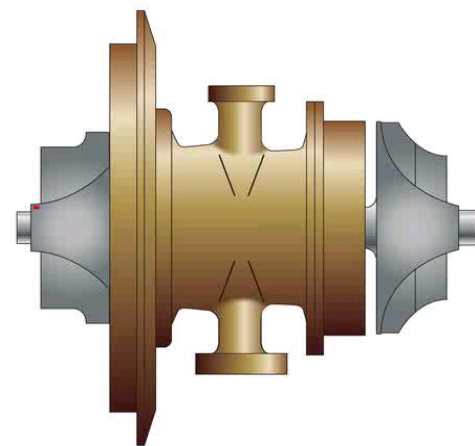


図-11 ASSYしたターボチャージャ

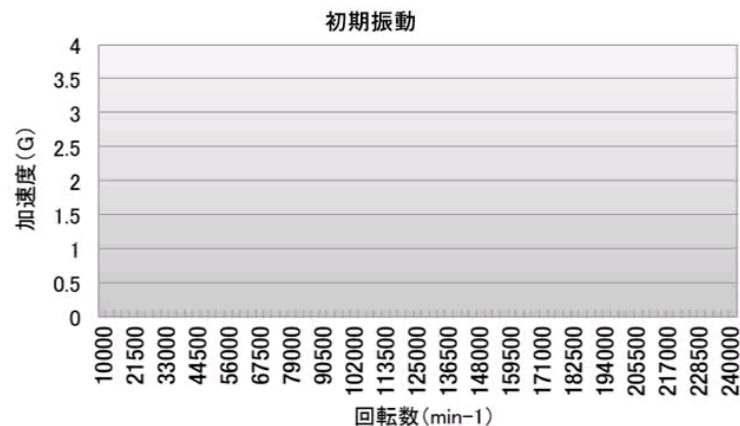


図-12 振動量-回転数特性

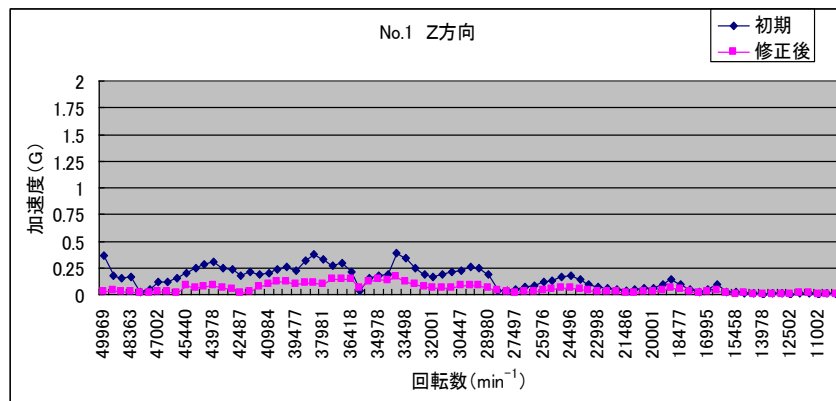
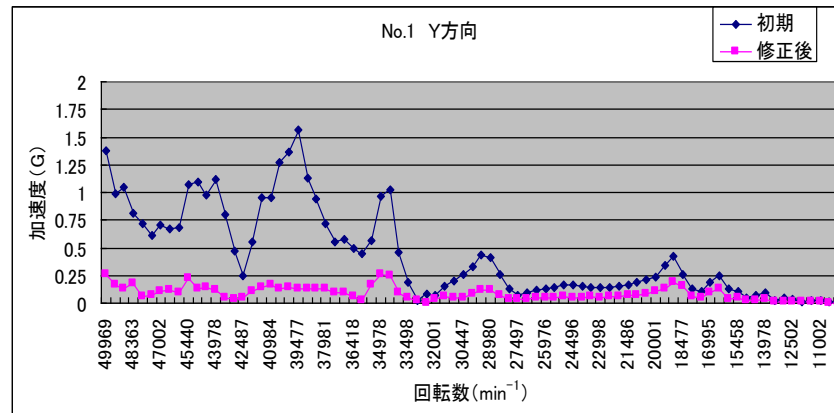
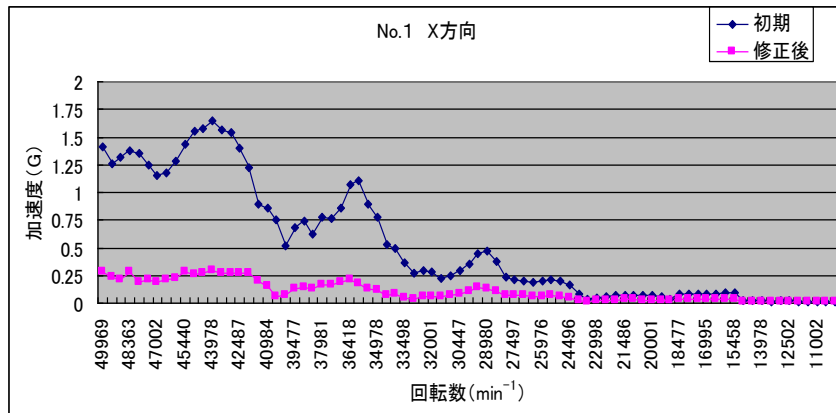
13-3 多速度・多面法の導入効果

修正の結果, いずれのサンプルも一回修正で0.5G以下に低減した。その結果を下記 5-1 ~ 5-3 に示している。

5-1. 許容値に近いサンプル

タービンシャフトの初期不釣り合い : $U_{1t} = 150\text{mg-mm}$ ($e_{1t} = 1.2\mu\text{m}$)

コンプレッサの初期不釣り合い : $U_{1c} = 159\text{mg-mm}$ ($e_{1c} = 5.8\mu\text{m}$)



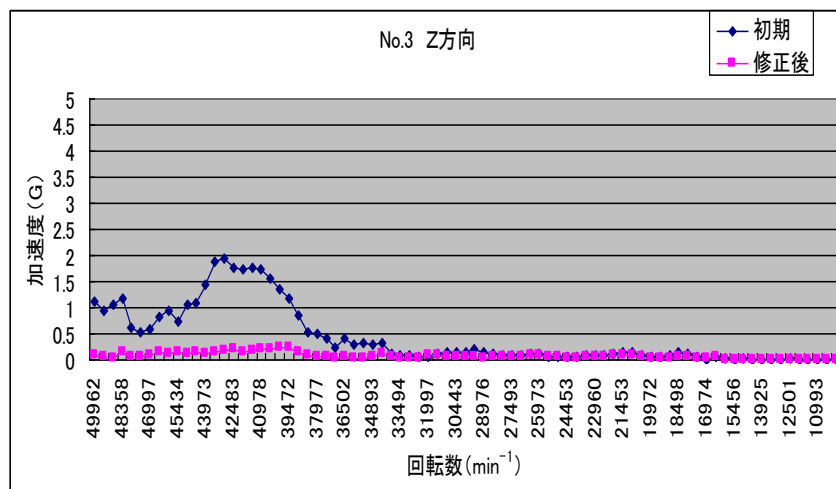
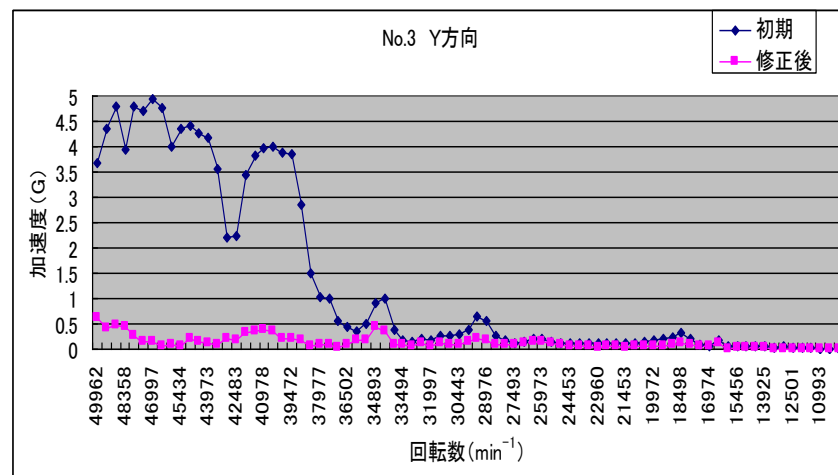
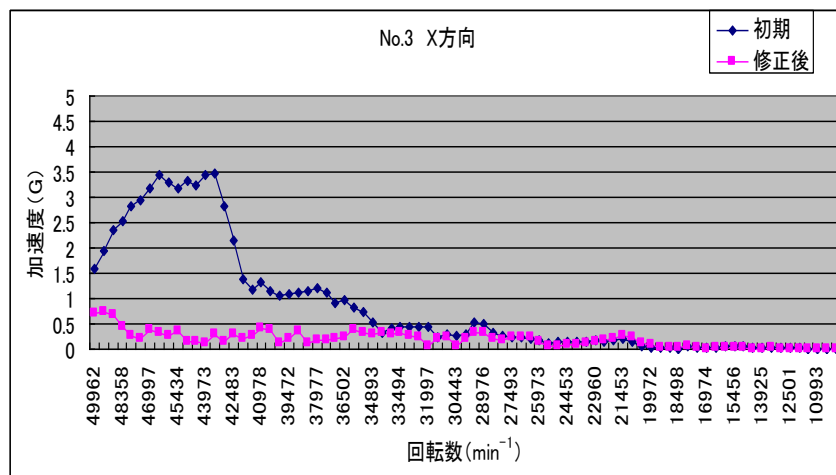
x, y 軸の47,000min⁻¹以上の低減率が低い理由は50,000min⁻¹以上の振動データを取得していないためである。今後は、駆動エア流量を増やして最高回転数まで振動データを取得し、修正演算に反映させる必要がある。

図-13 許容値に近いサンプル

13-4 許容値の約7倍のサンプル

タービンシャフトの初期不釣り合い : $U_{3t} = 865\text{mg}\cdot\text{mm}$ ($e_{3t} = 7.2\mu\text{m}$)

コンプレッサロータ初期不釣り合い : $U_{3c} = 80\text{mg}\cdot\text{mm}$ ($e_{3c} = 2.9\mu\text{m}$)



本項5-2のサンプル例のUB許容値は、参考文献の約7倍と大きいですが、左記のグラフに示すとおり、3次元の振動は劇的に低減しています。

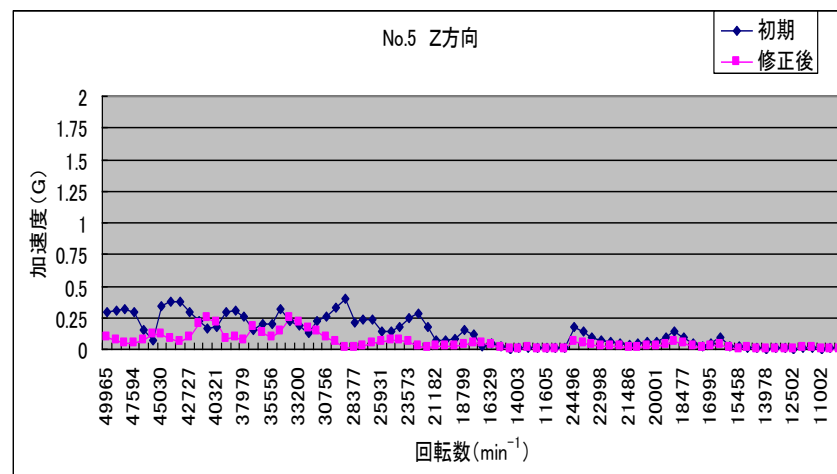
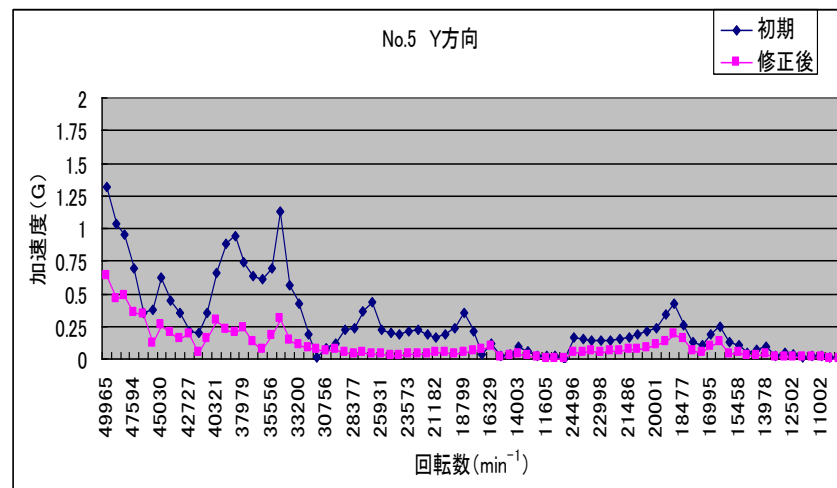
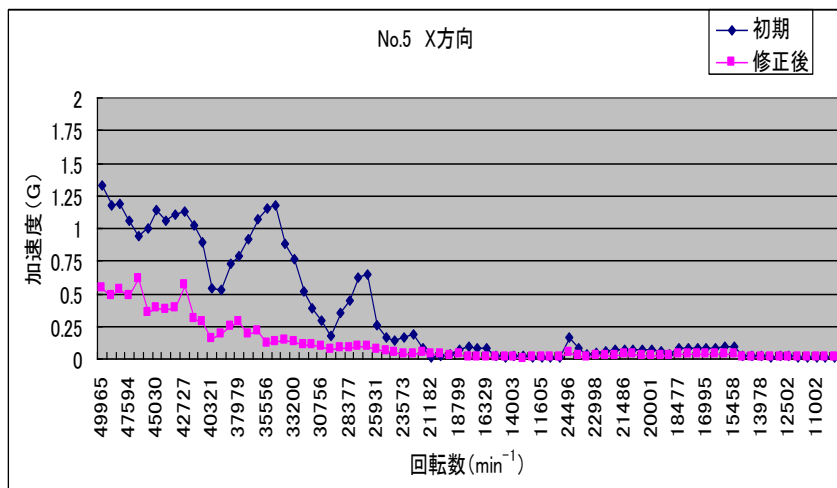
なお、x, y 軸の47,000min⁻¹以上で低減率が低下している理由は前述の5-1項のとおりです。

図-14 許容値の7倍のサンプル

13-5 許容値の約18倍のサンプル

タービンシャフト初期不釣合い : $U_{5t} = 1460 \text{mg}\cdot\text{mm}$ ($e_{5t} = 12.2 \mu\text{m}$)

コンプレッサロータ初期不釣合い : $U_{5c} = 490 \text{mg}\cdot\text{mm}$ ($e_{5c} = 18 \mu\text{m}$)



本例のUB許容値は参考文献の18倍にもなる例です。振動値が小さいのは、 U_{5t} と U_{5c} が偶不釣合いとなっているためと考えられます。

今後は、駆動エア流量を増やして最高回転数までの振動情報を取得し、高回転域の釣合わせ演算に反映させる必要があります。

なお、各部品の管理値は $e = 20 \mu\text{m}$ 程度と現状の20倍に広げることができます。

図-15 許容値の18倍のサンプル

13-6 多速度プリバランス修正の必要性

1. 各回転部品の不釣り合い修正前の不釣り合い量は、調査結果によると $1.2\sim 18\mu\text{ m}$ であった。これは、参考文献に記載の各回転部品の許容値と比較して18倍と大きな値でした。
2. 各部品のハメアイ公差($12.5\pm 23\mu\text{ m}$)を考慮すると、さらに大きな不釣り合いが想定されます。
3. これらの課題を解決するため、新たな不釣り合い修正法として、多速度プリバランス法を開発しました。

13-7 多速度プリバランス修正の効果

1. 多速度プリバランス方式は、単体部品A, Bの不釣り合い修正を省いて、いきなりタービンハウジングに組込み、不釣り合い修正を開始するので、生産性が飛躍的に向上します。
2. 従来の不釣り合い許容値の18倍と大きいにも関わらず、全回転領域を、一度の修正で 0.5G 以下に抑えています。これは、本方式が初期不釣り合いが大きく、運転回転領域の広い弾性体のバランス修正に適した手法と云えます。
3. 本方式は、全回転領域の多速度法による3次元振動を抑えることを目的とした手法です。これは、回転軸系の曲げ振動を抑え、ターボチャージャの性能と信頼性および機械寿命の延命につながります。

13-8 ターボチャージャーの多速度・多面バランサー

1) タービンシャフト専用

- 実際のタービンハウジングを利用した釣合い試験機でタービンシャフトを脱着して測定します。
- 低速域から約70000rpmの全回転域の釣合修正を可能にした、業界初の製品です。

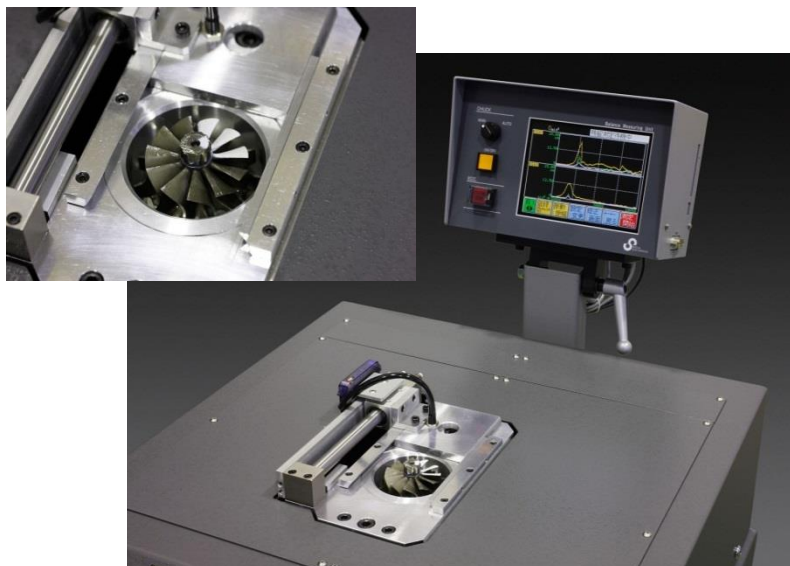


写真-2 ターボシャフト専用釣合い試験機

2) ターボ ASSY品専用

タービンシャフトとコンプレッサロータをハウジングにASSYした状態で実用最高回転数までの全回転域の3次元振動を0.5G以下に低減可能な、業界初の製品です。

max 240,000rpm



写真-3 ターボASSY専用釣合い試験機